

Е. АЙСБЕРГ

ТРАНЗИСТОР?.. ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО!



МАССОВАЯ РАДИОБИБЛИОТЕКА

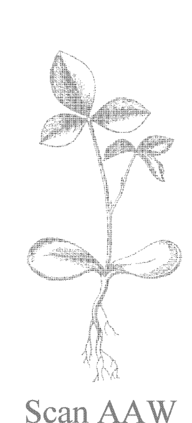
Выпуск 809

Е. АЙСБЕРГ

ТРАНЗИСТОР?.. ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО!

Перевод с французского
Ю. Л. СМИРНОВА

Издание третье, дополненное





«ЭНЕРГИЯ»
МОСКВА 1972

6Ф0.32
А 11
УДК 621.382.3

Айсберг Е.

А 11 Транзистор?.. Это очень просто! Пер. с франц. Изд. 3-е, доп. М., «Энергия», 1972.

144 с. с ил. (Массовая радиобиблиотека, вып. 809)

Книга содержит четырнадцать занимательных бесед, написанных в форме разговора между двумя действующими лицами.

Книга рассчитана на широкий круг читателей.

3-4-5 **6Ф0.32**

356-72

E. Aisberg

Le transistor? ... Mais c'est très simple!

Société des éditions radio

ПРЕДИСЛОВИЕ К РУССКОМУ ИЗДАНИЮ

Эта книга относится к серии популярных изданий Е. Айсберга, вышедших во Франции под названием... «Это очень просто!». Она написана в таком же стиле, как и первые две книги: «Радио?.. Это очень просто!» и «Телевидение?.. Это очень просто!», уже знакомые нашим читателям.

Как и в предыдущих книгах, редакция старалась сохранить своеобразие французского издания, формат книги и манеру верстки.

Книга знакомит широкие круги читателей с новой областью электроники — полупроводниковыми приборами, получившими огромное распространение.

Сложные физические процессы в полупроводниках изложены автором в весьма доступной форме для читателя, не имеющего специальной подготовки.

В основном книга посвящена транзисторам — наиболее важным из полупроводниковых приборов. Она помогает радиолюбителю понять принципы их действия, знакомит с использованием транзисторов в различных схемах и в конечном счете позволит читателю вести практическую работу с транзисторами.

В третьем издании по указанию Е. Айсберга сделаны некоторые изменения и исправления; в конце книги помещено письмо, в котором говорится о прогрессе, достигнутом за последние годы в области полупроводниковых приборов. Редакция Массовой радиобиблиотеки выражает благодарность автору за его любезные указания.

Отзывы просим направлять по адресу: Москва, М-114, Шлюзовая набережная, 10, издательство «Энергия», редакция Массовой радиобиблиотеки.

Редакция Массовой радиобиблиотеки

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

Как спокойно следили мы за мирной эволюцией радиотехники, пока в один прекрасный день 1948 г. появление транзистора не перевернуло все наши представления. Это была революция... За несколько лет полупроводниковые приборы завоевали основные области радиоэлектроники. Наряду с классической, привычной для «ламепистов» техникой возникла другая, совершенно новая. Многим радистам было трудно освоиться с новыми понятиями и прочувствовать особенности, свойственные кристаллическим приборам.

Существует много прекрасных, написанных на высоком техническом уровне работ о транзисторах; однако их чтение требует основательных знаний математики и физики твердого тела, усвоить которые довольно трудно. Но в магазинах редко найдешь хорошие книги, предназначенные для радистов-практиков, желающих проникнуть в мир транзисторов, понять происходящие в них физические явления и уметь без затруднений разбираться в современных схемах, где используются эти «трехлапые создания».

Вот почему мы попытались написать книгу, предназначенную для тех, кто уже владеет основами радиотехники (пусть даже это будет на уровне книги «Радио?.. Это очень просто!») и желает без особых трудов освоить особенности транзисторной техники.

Задача эта совсем не из легких. Транзистор поднимает совершенно иные, чем электронная лампа, и по-своему сложные проблемы. Взаимозависимость всех его параметров, малое входное сопротивление, сильное влияние температуры и много других препятствий стоят на пути к овладению новой техникой.

Вот почему по первоначальному замыслу книга должна была называться «Транзистор?.. Ну, это не так просто!» (в одном из первых абзацев высказывается именно такая идея). Однако по мере написания книги двум нашим друзьям Любознайкину и Незнайкину удалось убедить нас, что их взгляд на вещи не столь сложен. С этого момента стало логично дать книге название, подобное названиям двух наших книг о радио и телевидении.

Значит ли это, что содержание следующих за предисловием страниц будет усвоено без каких бы то ни было усилий? Разумеется, нет. Читатель должен будет призвать на помощь все свое внимание и продолжать изучение книги только после того, как освоится с основными понятиями [1]. И пусть юмор и некоторая легкомысленность рисунков на полях не создают в его голове иллюзию чрезвычайной легкости. Эти наброски помогают полнее понять текст и приносят некоторую разрядку, педагогическую ценность которой нам трудно переоценить. Но для приобретения знаний необходимо работать,

---

[1] Внимание! В связи с тем что электрический ток образуется перемещением электронов, которые движутся по внешней цепи от отрицательного полюса к положительному, именно такое направление тока и принято на страницах этой книги (оно обратно общепринятому условному направлению тока).

работать и работать усидчиво, прилежно и, что самое главное, регулярно.

Некоторые найдут в нашей книге то, что они уже знают, как, например, построение нагрузочной прямой или наилучшие условия передачи мощности. Тем лучше для них. Другим же, наоборот, придется напрячь свое воображение, чтобы понять использование кривых характеристик, к чему мы часто прибегаем.

Пусть читатель не ищет здесь полной и строгой теории транзисторов. Не следует также искать здесь и описания конструкции различных приборов. Мы стремились помочь читателю понять принципы. Из всей массы понятий и схем, представляющих собой бурно развивающуюся технику, мы старались выделить самое главное, оставив в стороне всё, что кажется несущественным и проходящим.

Оба действующих лица, живой диалог которых заполняет страницы книги, не отличаются ни ученостью, ни серьезностью. Они решительно придерживаются взглядов Монтескье, утверждавшего, что «серьезность — счастье глупцов». Поэтому будем надеяться, что, изучая эти страницы, читатель получит двойное удовольствие: развлекаясь — постигать новое. Этого блага мы ему и желаем.

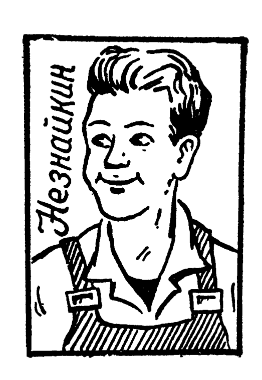
Е. Айсберг

Действующие лица

Любознайкин — молодой преподаватель радиоэлектроники, некогда изучивший основы радиотехники с помощью своего дяди Радиоля; он всегда готов удовлетворить неистощимую любознательность своего друга...

...**Незнайкин**, который был его первым учеником. Их беседы изложены в двух книгах («Радио?.. Это очень просто!» и «Телевидение?.. Это очень просто!»), где можно убедиться, что если этому парню иногда не хватает элементарных знаний, то как бы в качестве компенсации этого недостатка он наделен необычайной понятливостью и способностью усваивать. В настоящее время Незнайкин работает монтажником на заводе, выпускающем радиоприемники.





БЕСЕДА ПЕРВАЯ

ЖИЗНЬ АТОМОВ

Невозможно понять работу транзисторов, не углубив предварительно некоторых познаний в физике и химии относительно строения атома и соединений атомов. К этому и стремятся наши друзья в своей первой беседе.

Содержание: Полупроводники. Принцип работы и преимущества транзистора. Влияние температуры на транзисторы. Пределы по частоте и по мощности. Молекулы. Атомы. Протоны, нейтроны и электроны. Распределение электронов по оболочкам. Ионизация. Валентное число. Кристаллическая решетка.

НЕЗНАЙКИН — ЖЕРТВА ТРАНЗИСТОРНЫХ ПРИЕМНИКОВ

Любознайкин. — Рад видеть тебя, дорогой друг. Хорошо ли ты провел отпуск?

Незнайкин. — Увы, нет.

Л. — Погода была неблагосклонна, облачное небо или море разбушевалось?

Н. — Совсем нет, в этом отношении мне повезло — погода была идеальная. Но на пляже не было никакой возможности отдохнуть, так как повсюду отдыхающие гремели своими транзисторными приемниками. Перекличка безголосых певичек и мотивы диких танцев подвергли мои нервы жестокому испытанию. А в довершение этих невзгод я, желая понять, как эти транзисторные приемники могут наделать столько шума, попытался читать книги, которые должны были открыть мне глаза на теорию и вопросы применения... и ничего в них не понял!

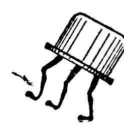
Л. — Я понимаю твое огорчение от этой неудачи. Но пусть твое самолюбие не страдает: поверь мне, транзисторы не такая простая штука! Открывая Международный конгресс по транзисторам, который в мае 1959 г. состоялся в Лондоне, лорд Хейлшем сказал: «Я думаю, что даже в наиболее развитых в промышленном отношении странах один из десяти тысяч человек не сможет объяснить, что такое транзистор или даже что такое полупроводник».

Н. — Это меня утешает, и тем более, что, как мне кажется, я могу сказать, что такое полупроводник.

Л. — Незнайкин, браво! Ну, выкладывай свои знания.

ТРЕХЛАПОЕ СОЗДАНИЕ

Н. — Ну, начнем хотя бы с того, что полупроводник должен иметь сопротивление, во много раз большее, чем у проводников и значительно меньшее, чем у изоляторов.



Л. — Правильно, но это слишком общее определение. Чтобы быть более точными, скажем, что у такого полупроводника, как германий (который в основном используется для производства транзисторов), удельное сопротивление в 30 миллионов раз больше, чем у меди, и в миллион миллионов раз меньше, чем у стекла (рис. 1).

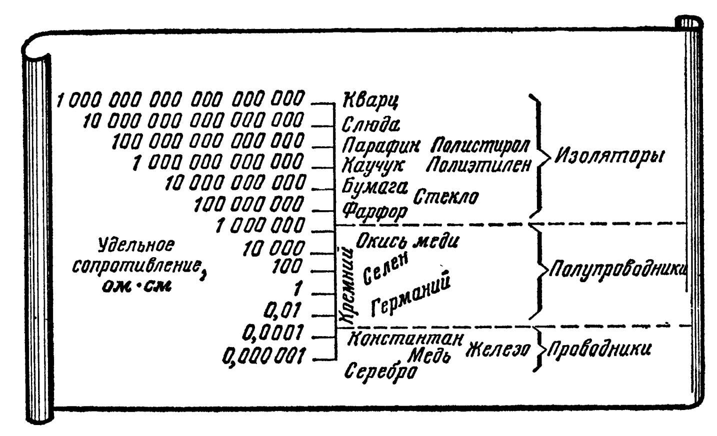


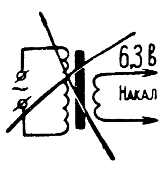
Рис. 1. Распределение важнейших проводниковых, полупроводниковых и изоляционных материалов в зависимости от их удельного сопротивления. Здесь видно, что удельное сопротивление полупроводников изменяется в очень широких пределах и что они занимают довольно широкую область.

Н. — Одним словом, в таблице удельных сопротивлений он стоит ближе к проводникам, чем к изоляторам?

Л. — Да, и именно потому, что германий в некоторой мере проводит ток, из него можно делать «трехлапые создания».

Н. — Кого ты так называешь?

Л. — Такое название можно дать транзисторам, так как они имеют три проволочных вывода.



Н. — Если я правильно понял, транзистор заменяет электронную лампу. Может ли он выполнять все ее функции и какие преимущества по сравнению с лампой он имеет?

Л. — Ну вот, на меня и обрушился поток вопросов!.. Да, мой дорогой Незнайкин, транзистор, как и электронная лампа, может усиливать и детектировать сигналы; он также способен генерировать электрические колебания; его можно использовать в качестве преобразователя частоты и во всех других случаях, где до сих пор применялись вакуумные электронные лампы. Что же касается преимуществ, то у транзисторов их много. Начнем хотя бы с отсутствия накала.



Н. — Это чудесно! Значит, не нужно больше специального источника для питания накала?

Л. — Нет, не нужно, и поэтому транзисторы начинают работать немедленно, как только на них подадут напряжение, тогда как для ламп на подогрев уходит несколько десятков секунд, пока их катоды не достигнут температуры, необходимой для нормальной эмиссии электронов.

Н. — Я думаю, что отсутствие накала должно также повысить коэффициент полезного действия, так как при использовании ламп значительная часть энергии источника питания теряется в виде теплоты.

Л. — Совершенно верно. Транзистору чуждо характерное для всех радиоламп разбазаривание ваттов, которые бесполезно уходят в калории. Там, где электронная лампа обычно потребляет 2 или 3 *вт*, транзистор удовлетворяется десятками милливатт, т. е. мощностью, в сотню раз меньшей. А вместо 200 *в*, необходимых для приемно-усилительных ламп, транзистору вполне достаточно напряжения до 10 *в*.

Н. — Значит, одна или две обычные батарейки для карманного фонаря вполне удовлетворяют скромный аппетит приемника на транзисторах?

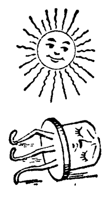
Л. — Да, именно так питаются портативные приемники, которые отравляли твое существование на пляже.

Н. — Можно ли также думать, что транзисторы прочнее и долговечнее электронных ламп, раз у них нет ни обрывающейся нити накала, ни катода, теряющего в конце концов свою эмиссию?

Л. — Правильно. Транзистор отличается прочностью (ведь это кусочек германиевого или кремниевого кристалла, снабженный тремя выводами и помещенный в корпус), малым весом и миниатюрностью.

Н. — Чудесно! Одни преимущества и нет недостатков!

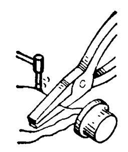
ОБОРОТНАЯ СТОРОНА МЕДАЛИ



Л. — Вот опасность поспешных выводов! К сожалению, транзистор имеет и недостатки. При температуре выше 55° С его к. п. д. довольно быстро падает; а если температуру поднять выше 85° С, то и после охлаждения он потеряет свои первоначальные качества [1]. Это верно по крайней мере для германиевых транзисторов. Кремниевые транзисторы свободно выдерживают значительно более высокие температуры: их не испугаешь температурой и в 150° С. Дело в том, что в кремнии, как ты увидишь потом, электроны поверхностной оболочки сильнее связаны с ядром атома.

Н. — Я обещаю тебе никогда не прикасаться своим паяльником к транзистору.

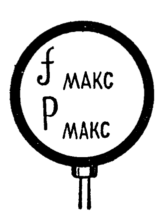
Л. — И хорошо сделаешь. Впрочем, чтобы припаять выводы транзистора, необходимо перехватить калории, выделяемые наконечником паяльника, и не дать им достичь активного элемента транзистора.



Н. — А как это сделать?

Л. — Очень просто: надо зажать плоскогубцами часть проволочного вывода между транзистором и местом пайки... Кроме того, выводы транзисторов обычно делают из проволоки, плохо проводящей тепло (но, к счастью, хорошо проводящей ток!).

Н. — Можно ли в чем-нибудь еще упрекнуть транзистор?



Л. — К несчастью, да. Его возможности ограничены по частоте и по мощности. Он не может работать на частотах, превышающих несколько тысяч мегагерц...

Н. — Но это не так уж плохо, если вспомнить, что мегагерц — это миллион периодов в секунду.

Л. — Он также не может работать при больших мощностях, так как в этом случае теплота, выделяемая в транзи-

---

[1] Некоторые мощные транзисторы выдерживают температуру, близкую к 100° С. Это достигается введением в полупроводниковый материал относительно больших доз примесей.

сторе, резко ухудшает его отдачу. Тем не менее удается превысить мощность в 100 *вт*.

Н. — Не думаешь ли ты, что эти недостатки исключают возможность широкого применения транзисторов?

Л. — Конечно, нет. С тех пор как транзистор был изобретен в 1948 г. тремя американскими физиками — Бардиным, Брэттейном и Шокли, которые получили за это изобретение Нобелевскую премию, он непрерывно совершенствовался. Уже сейчас транзистор в большинстве случаев может успешно заменить электронную лампу. Но тем не менее я не думаю, что когда-нибудь придет такой день, когда можно будет полностью отказаться от применения электронных ламп.

ВОЗВРАЩЕНИЕ К ИСТОКАМ

Н. — Теперь, когда меня больше не осаждает нестройный ансамбль портативных приемников с пляжа, я больше чем когда бы то ни было хочу понять, как работают транзисторы и каким образом их можно использовать.

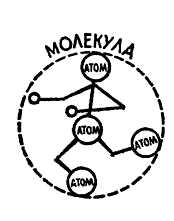
Л. — Любопытная вещь: насколько просты наиболее распространенные транзисторные схемы, настолько сложны явления, происходящие в этих крохотных полупроводниковых приборах.

Н. — Я подозреваю, что в транзисторе, как и в лампе, имеются катод, сетка и анод.

Л. — Действительно, там различают области, которые в известной мере играют роль, аналогичную электродам вакуумного триода: эмиссия потока электронов, регулировка плотности и его фокусировка. И если ты желаешь, я могу кратко рассказать о применении транзисторов, не анализируя принципа их работы. Согласен?

Н. — Нет, я предпочитаю разобраться, что там в действительности происходит. Ты приучил меня рассуждать и анализировать механизм изучаемых явлений. Сохраним же эту традицию.

О МОЛЕКУЛАХ И АТОМАХ



Л. — Ты прав. Но в этом случае мы должны начать с начала, т. е. со строения материи.

Н. — Мне кажется, что это... материя, которую мы давно знаем. Самая маленькая частица вещества, сохраняющая все его химические свойства, называется м о л е к у л о й — так сказано в моем учебнике физики.

Л. — Однако там не сказано, что в настоящее время мы знаем около полумиллиона разных молекул, являющихся результатом различных комбинаций примерно ста простых элементов.



Н. — Да, но там сказано, что все молекулы находятся на некотором расстоянии одна от другой (чем и объясняется сжимаемость всех тел), что они притягивают одна другую (к нашему счастью, иначе все предметы немедленно же рассыпались бы в пыль) и что они находятся в беспорядочном движении, скорость которого по мере повышения температуры увеличивается.

Л. — Браво, Незнайкин! Ты все меньше и меньше оправдываешь теперь свое имя... Раздробим молекулы, которые

состоят из атомов, т. е. элементарных частиц простых веществ (или элементов). Каждый атом, как ты знаешь...

Н. — ...представляет собой как бы миниатюрную солнечную систему со своим солнцем-ядром, состоящим из протонов (элементарных положительно заряженных частиц) и нейтронов, а планетами этой системы являются электроны, или вращающиеся вокруг ядра элементарные частицы отрицательного электричества (рис. 2).

Л. — Ты говоришь как по книге, но нужно быть осторожным с аналогиями. Если все планеты солнечной системы движутся в одной плоскости, то у электронов орбиты располагаются в разных плоскостях. И эти орбиты расположены в пространстве не по воле случая: они могут занимать лишь определенные места, носящие название оболочек *K*, *L*, *M*, *N*, *O*, *P* и *Q*. Эти оболочки упрощенно можно представить себе в виде концентрических сфер, в центре которых находится ядро, а радиусы этих сфер пропорциональны квадрату их номера.

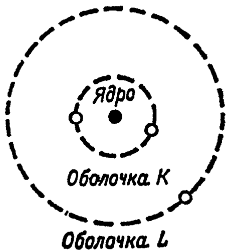
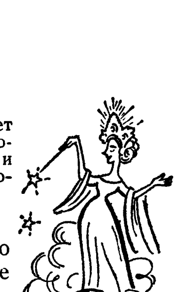
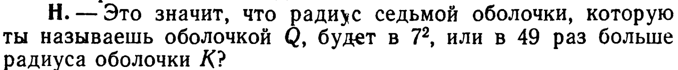


Рис. 2. Атом лития имеет два электрона, вращающихся на оболочке *K*, и один электрон на оболочке *L*.

Н. — Подожди, Любознайкин! Для меня это сразу слишком сложно.

Л. — Нет ничего проще. Оболочка *K* — это оболочка номер 1. Следовательно, у оболочки *L*, имеющей номер 2, радиус будет в $2^2 = 4$ раза больше, а у оболочки *M* радиус будет в $3^2 = 9$ раз больше и т. д.





Н. — Это значит, что радиус седьмой оболочки, которую ты называешь оболочкой *Q*, будет в 7^2, или в 49 раз больше радиуса оболочки *K*?

Л. — Разумеется. А кроме того, энергия, которой обладает каждый электрон, возрастает по мере увеличения номера (обычно говорят «квантового числа») оболочки, на которой он находится.

Н. — Расстояния до ядра увеличиваются от оболочки к оболочке, но какова их реальная величина?

Л. — Самая близкая к ядру оболочка *K* находится от него на расстоянии $5 \cdot 10^{-9}$ *см*, но я боюсь, что это тебе ничего не говорит. Представь себе фею, которая ударом волшебной палочки может увеличивать вещи в 10 раз. Если наша фея 14 раз подряд ударит своей волшебной палочкой по атому углерода[1]...

Н. — ...атом увеличится в 10^{14} раз и, возможно, достигнет размеров целого земного шара, так что его и пристроить будет некуда. Вот будет фее хлопот!

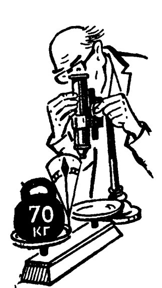
Л. — Совсем нет. Протоны станут величиной с простое яблоко, а электроны (хотя масса каждого из них в 1 837 раз меньше массы протона) станут с футбольный мяч. И если ядро такого атома положить на паперть Собора Парижской богоматери, то два электрона оболочки *K* будут вращаться на расстоянии 5 *км*, т. е. еще не выйдут за пределы Парижа. Что же касается четырех электронов внешней оболочки, то они будут вращаться в пригородной зоне на расстоянии 20 *км* от ядра, например, будут проходить через Версаль.



---

[1] Ядро атома углерода содержит 6 протонов и 6 нейтронов, этот атом имеет 6 электронов, из которых 2 находятся на оболочке *K* и 4 на оболочке *L*.

У НЕЗНАЙКИ КРУЖИТСЯ ГОЛОВА

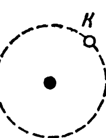


Н. — Но что же находится между нашими яблоками и футбольными мячами?

Л. — Ничего! Пустота. Но, разумеется, существуют электрические, магнитные, гравитационные и другие силы взаимного притяжения, поддерживающие всю эту систему в состоянии равновесия. Заряды с противоположными знаками взаимно притягиваются, поэтому электроны не уходят от своего ядра, несмотря на центробежные силы, стремящиеся их оторвать от ядра.

Н. — Ты меня пугаешь. Если это так, то атом состоит скорее из пустоты, чем из материи.

Л. — Совершенно верно, мой друг! И если бы удалось спрессовать все ядра и все электроны, составляющие, к примеру, твое тело, так, чтобы между ними не осталось пустоты, то получилось бы зернышко, едва различимое под микроскопом, но весящее, как и ты, 70 *кг*.



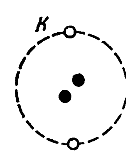


Рис. 3. Вот два самых простых атома: атом водорода (слева) и атом гелия (справа).



Н. — У меня мурашки пробегают по коже каждый раз, когда ты напоминаешь мне, что я также состою из атомов. Но теперь, когда ты открыл мне, что во мне царит пустота, я испытываю жуткое головокружение.

Л. — Поэтому мы поступим благоразумно, если в дальнейшем будем говорить о других атомах, а не об атомах твоего тела. Чтобы более наглядно представить себе строение атома, условимся обозначать каждую оболочку в виде окружности. Как ты, очевидно, знаешь, наиболее простое строение имеет атом водорода. Он состоит из одного протона и одного электрона, находящегося на оболочке *К*. В атоме гелия вокруг двух протонов ядра на этой же оболочке *К* вращаются два электрона (рис. 3).

Н. — А какой элемент имеет три электрона на оболочке *К*?

ОГРАНИЧЕННОЕ КОЛИЧЕСТВО МЕСТ

Л. — Никакой, так как эта оболочка не может иметь больше двух электронов. Точно так же оболочка *L* не может иметь больше 8 электронов. На оболочке *M* может присутствовать не более 18 электронов, на оболочке *N* — не более 32, на оболочке *O* — не более 50, на оболочке *P* — не более 72 и на оболочке *Q* — не более 98 электронов.

Н. — Очень любопытна эта последовательность чисел, которые ты называешь с такой легкостью.

Л. — Тут нет моей заслуги, так как эти числа определяются по очень простому закону:

Для оболочки *К*: $1^2 \times 2 = 2$.

Для оболочки *L*: $2^2 \times 2 = 8$.

Для оболочки *M*: $3^2 \times 2 = 18$.

Для оболочки N: $4^2 \times 2 = 32$.
Для оболочки O: $5^2 \times 2 = 50$.
Для оболочки P: $6^2 \times 2 = 72$.
Для оболочки Q: $7^2 \times 2 = 98$.

Н. — В общей сложности 280. Значит, имеются атомы, содержащие такое количество электронов.

Л. — Нет, потому что если оболочка K, L, M и N действительно могут иметь указанное мною количество электронов, то на оболочке O на практике их не бывает больше 18, на оболочке P — больше 32 и на оболочке Q — больше 10 (рис. 4).

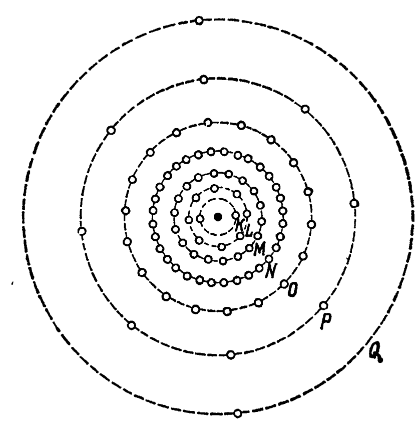


Рис. 4. Схематическое изображение атома радия, показывающее распределение электронов по различным оболочкам. В действительности орбиты располагаются в различных плоскостях.



Н. — Это очень интересно, но мне кажется, что мы рискуем заблудиться в лабиринтах атомной и ядерной физики.

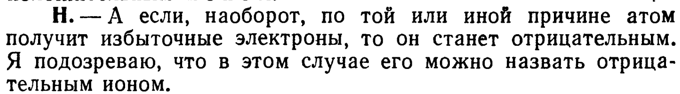
Л. — Напротив, мы сейчас же примем решение, которое в значительной мере облегчит нам изучение всех этих вопросов. Если ты согласен, мы будем учитывать только электроны, находящиеся на внешней оболочке атома.

Н. — Хорош же ты! Открыв мне существование многочисленных оболочек, из-за чего атом напомнил мне луковицу, ты сразу же запрещаешь мне очистить эту луковицу. Уж не хочешь ли ты уберечь меня от слез?..

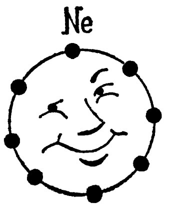


НЕЙТРАЛЬНОЕ СОСТОЯНИЕ И ИОНИЗАЦИЯ

Л. — Решение, которое мы должны принять, вполне законно. Что нас интересует в конечном счете? — Электрическое состояние атомов. Однако обычно атом содержит электронов столько же, сколько и протонов, в результате чего отрицательные заряды первых уравновешиваются положительными зарядами вторых. Такой атом электрически *нейтрален*. Но может случиться, что внешние силы вырвут у атома один или несколько электронов. В этом случае равновесие нарушается: общая сумма отрицательных зарядов электронов оказывается



меньше положительного заряда ядра. Такой атом становится положительным и о н о м.



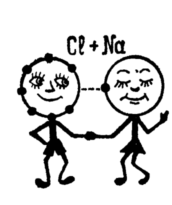
Н. — А если, наоборот, по той или иной причине атом получит избыточные электроны, то он станет отрицательным. Я подозреваю, что в этом случае его можно назвать отрицательным ионом.

Л. — Превосходно! Однако такие потери или приобретения электронов (именуемые и о н и з а ц и е й) могут иметь место главным образом на внешней оболочке, т. е. там, где меньше проявляется сила притяжения ядра.

Н. — Да, я понимаю, что в этих условиях нас могут интересовать только электроны, находящиеся на этой внешней оболочке.

СУПРУЖЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Л. — Для этого есть еще одна причина. Именно эта оболочка определяет химические свойства элементов. Атом действительно удовлетворен своим существованием только тогда, когда имеет на своей внешней орбите 8 электронов. В этих условиях атом стабилен и не помышляет ни о приобретении, ни о потере электронов. Так, например, неон, имеющий на своей внешней оболочке *L* 8 электронов, весьма этим счастлив и не стремится вступить в связь с каким бы то ни было другим химическим элементом. А фтор, имеющий на этой же внешней оболочке только 7 электронов, только и думает, как бы вступить в комбинацию с другим элементом, способным уступить ему 1 электрон для пополнения состава внешней оболочки до 8.



Н. — А как осуществляются такие супружеские сочетания?

Л. — Возьми для примера хлор, у которого на внешней оболочке *M* 7 электронов, и натрий, имеющий 2 электрона на оболочке *K*, 8 электронов на оболочке *L* и только 1 электрон на оболочке *M*. Вот тебе пример идеальной пары. Входя в комбинацию с хлором, натрий передает ему свой единственный электрон с внешней оболочки и доводит до 8 количество электронов на внешней оболочке. Одновременно с этим у натрия внешней станет оболочка *L* со своими 8 электронами, принеся ему тем самым высокую стабильность (рис. 5).



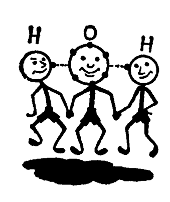
Н. — Да, но получив избыточный электрон, хлор окажется ионизированным отрицательно, а потерявший свой электрон натрий станет положительным ионом?

Л. — Разумеется. Взаимное притяжение этих двух ионов сделает стабильной конструкцию молекулы, появившейся в результате этого бракосочетания.

Н. — А как называется новое вещество?

Л. — Хлористый натрий, если ты будешь покупать его в магазине химических реактивов, но в бакалее это же вещество продается под названием поваренной соли.

Н. — Я в этом не был уверен... А теперь я предполагаю, что таким образом можно объяснить и другие бракосочетания атомов. Как, например, происходит это при образовании молекулы воды?



Л. — Объединение происходит очень любезно. Атом кислорода имеет на внешней оболочке *L* 6 электронов, следовательно, на ней имеется еще два свободных места, и для заполнения их кислород занимает электроны у двух атомов водорода, так как, позволь тебе напомнить, атомы водорода имеют всего лишь по одному электрону (рис. 6).

Н. — Теперь я понимаю, почему молекула воды состоит из одного атома кислорода и двух атомов водорода.

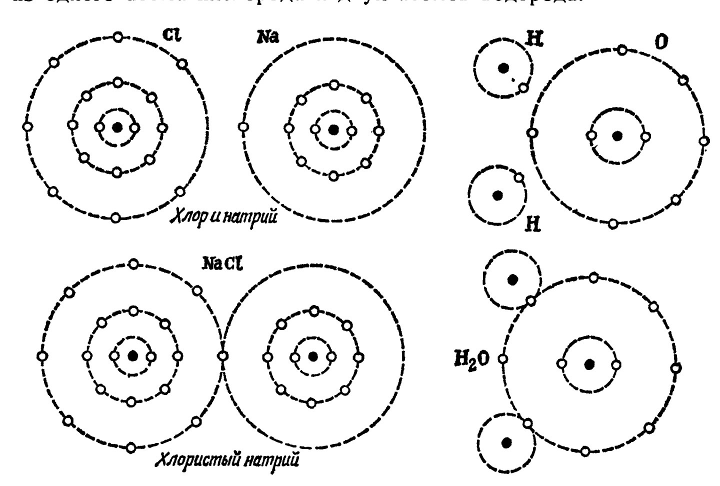


Рис. 5. При соединении атома хлора (Cl) с атомом натрия (Na) образуется молекула хлористого натрия.

Рис. 6. Два атома водорода (H) своими электронами дополняют количество электронов на оболочке L атома кислорода (O) до восьми. В результате объединения этих трех атомов образуется молекула окиси водорода, именуемая обычно... водой (H_2O).

Л. — Внешнюю оболочку часто называют валентной, имея в виду, что количество электронов на ней показывает, в какие комбинации может вступать атом.

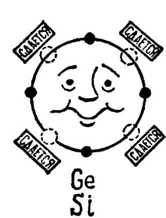
Порядковый номер атома	Название элемента	Условное обозначение	Количество электронов на каждой оболочке				
			K	L	M	N	O
13	Алюминий	Al	2	8	3		
14	Кремний	Si	2	8	4		
31	Галлий	Ga	2	8	18	3	
32	Германий	Ge	2	8	18	4	
33	Мышьяк	As	2	8	18	5	
49	Индий	In	2	8	18	18	3
51	Сурьма	Sb	2	8	18	18	5

Рис. 7. Распределение электронов (общее количество которых носит название «атомного номера») по различным оболочкам у основных элементов, используемых для изготовления транзисторов.

Валентным числом называют количество недостающих до стабильного состояния электронов или же наоборот, количество электронов, которые атом способен отдать другому атому, чтобы стать стабильным.

Н. — Прости меня, но это мне не совсем понятно.

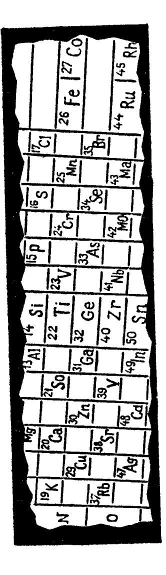
Л. — Если на внешней оболочке имеется 6 или 7 электро-



нов, то до полного комплекта из 8 электронов ей недостает соответственно 2 или 1 электрона. О таких атомах говорят, что они двухвалентны и одновалентны. Но если внешняя оболочка содержит 1, 2 или 3 электрона, то атом будет склонен отдать эти электроны. В этом случае мы имеем одновалентные, двухвалентные и трехвалентные элементы.

Н. — А если внешняя оболочка имеет 4 электрона?

Л. — В этом случае атом был бы более счастлив объединиться с другим атомом, имеющим также 4 электрона на внешней оболочке. Следовательно, такой атом четырехвалентен. Именно такие атомы у германия и кремния, используемых в производстве транзисторов, и у углерода. Наконец, если внешняя оболочка содержит 5 электронов, то атом называется пятивалентным. И возвращаясь к вопросу о транзисторах, я представляю тебе несколько химических элементов, используемых при их производстве. С одной стороны, это алюминий, индий и галлий, внешняя оболочка которых содержит только 3 электрона, т. е. трехвалентные элементы, а с другой стороны, мышьяк и сурьма с 5 электронами на внешней оболочке, т. е. пятивалентные элементы (рис. 7).



ОБЩЕСТВЕННАЯ ЖИЗНЬ АТОМОВ

Н. — Неужели мы будем рассматривать таким способом все химические элементы?

Л. — Нет, успокойся. Мы ограничились элементами, имеющими важное значение в технологии транзисторов. Но мы допустим ошибку, если изучим только индивидуальную психологию атомов. Нас особенно должна интересовать их общественная жизнь. За исключением таких неисправимых индивидуалистов, как неон с 8 электронами на внешней орбите,

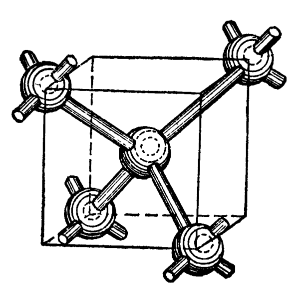


Рис. 8. Атом германия, находящийся в центре куба, связан своими валентными электронами с четырьмя другими атомами (куб нарисован лишь для того, чтобы пояснить расположение атомов в пространстве). Кристаллы углерода и кремния имеют аналогичную структуру.

которые боязливо отказываются от всякого объединения, атомы (не забывай этого!) живут в обществе. И их группировки имеют более или менее организованный характер. В твердых телах (за исключением тех, которые по своей структуре похожи на жидкости, как, например, стекло) атомы расположены в строго определенном порядке: они образуют кристаллические решетки.

Н. — Каким же образом они объединяются?

Л. — Это зависит от характера вещества.

Возьмем в качестве примера германий или кремний. В этих веществах каждый атом своими четырьмя внешними электронами связан с четырьмя другими атомами: по одному

электрону на каждый соседний атом. В свою очередь, каждый из соседних атомов отдает для связи с данным атомом по одному электрону. Я нарисовал здесь только один атом, связанный с четырьмя своими соседями (рис. 8). Но каждый из них, в свою очередь, связан с четырьмя соседними атомами (в том числе и с атомом, изображенным в центре нашего рисунка) и т. д. Теперь создается впечатление, что каждый атом имеет по 8 периферийных электронов, что, как ты видел, определяет условие стабильности. Попытайся представить правильное размещение атомов в пространстве.

Н. — Очень забавная картинка: висящие в пустоте шарики, каждый из которых наподобие индусских богов протягивает своим соседям четыре руки!.. И все твердые тела образуют подобные кристаллы?



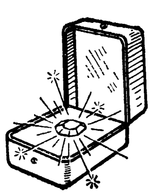
Л. — Нет, Незнайкин. Но несколько других элементов имеют такое же распределение атомов, в частности, углерод, большие кристаллы которого называются...

Н. — ...алмазами. Это, мой дорогой друг, я знал. Нам повезло, что транзисторы делают из германия, а не из алмазов, иначе транзисторы стоили бы очень дорого.

Л. — Да, для нас с тобой, мой друг, это было бы очень и очень накладно... Однако существует много других типов кристаллов, которые нас сегодня не интересуют. Но нам чрезвычайно важно изучить свойства электронов внешней оболочки или, как их еще называют, *периферийных* электронов.

Н. — Ты мне сказал, что они легче других отрываются от атома, потому что слабее притягиваются его ядром.

Л. — Это правильно, но они отрываются лишь тогда, когда на внешней оболочке их мало — один, два или три. Под этот случай попадают все металлы. Золото, серебро и медь имеют всего лишь по одному периферийному электрону; железо, цинк, магний — по два, а алюминий имеет три электрона. Эти электроны легко отрываются от атома и, став свободными, образуют тот поток электронов, который мы называем электрическим током. В отличие от металлов металлоиды имеют больше электронов на внешней оболочке, и эти электроны не проявляют тенденции к бродяжничеству, к которому так склонны их собратья, находящиеся в атомах металлов. Вот почему металлоиды являются изоляторами.



Н. — А германий со своими четырьмя электронами тоже представляет собой изолятор?

Л. — И да, и нет, мой дорогой друг. В следующий раз я объясню тебе, что означает мой достойный древнегреческого оракула ответ.

◎

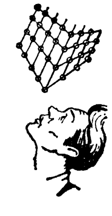
БЕСЕДА ВТОРАЯ

ПЕРЕХОДЫ

Примеси, содержащиеся в полупроводниках даже в ничтожных количествах, резко изменяют электрические свойства этих материалов. Двое наших друзей изучают здесь, что происходит, когда чужеродные атомы нарушают правильную структуру кристаллической решетки.

Содержание: Собственная проводимость. Фоторезисторы и фотоэлементы. Примеси. Доноры. Дырки. Акцепторы. Полупроводники типов *p* и *n*. Переход. Потенциальный барьер. Прямое и обратное напряжения. Напряжение пробоя. Диод. Выпрямление тока полупроводниками.

СПОКОЙНАЯ СЕМЕЙНАЯ ЖИЗНЬ АТОМОВ



Незнайкин. — Я много думал о твоих кристаллических решетках и даже пошел во Дворец открытий[1] посмотреть модели, изображающие структуру различных кристаллов. Эти модели очень красивы: разноцветные маленькие шарики, изображающие атомы, соединены металлическими трубочками, представляющими валентные связи.

Любознайкин. — Поздравляю, что ты с такой пользой провел свой досуг. А к чему же привели твои размышления?

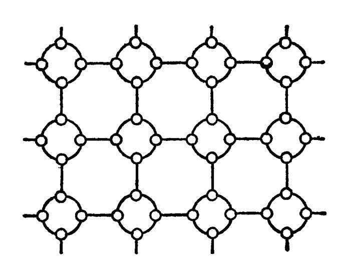
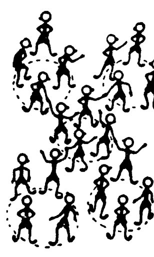


Рис. 9. Кристаллическая решетка может быть представлена в виде схемы, хотя в действительности межатомные связи расположены не в одной плоскости, а в пространстве.



Н. — К идее, что кристалл германия похож на большое количество семей, каждая из которых имеет по четыре ребенка, а каждый ребенок одной семьи женат на ребенке одной из четырех соседних семей. Таким образом, по супружеским связям каждая из семей породнилась с четырьмя другими (рис. 9).

Л. — Ты нарисовал совсем неплохую картину, она даже поможет объяснить тебе дальнейшее. Действительно, в описанном тобой исключительно уравновешенном обществе нельзя ожидать больших потрясений, если все пары будут сохранять

[1] Музей в Париже, аналогичный Политехническому музею в Москве. *Прим. перев.*

безупречную верность. И в нашем кристалле германия все электроны должны оставаться крепко привязанными к своим атомам прочными валентными связями.

Н. — Но что ты сделаешь с человеческими страстями?

О НЕСКОЛЬКИХ РАЗВОДАХ

Л. — Ты, как я вижу, прочитал какой-нибудь сентиментальный роман... Ну, ладно. Точно так же, как людьми движут страсти, атомы подвержены тепловому воздействию, которому время от времени удается вырвать из той или иной связи электрон и освободить его. А ты знаешь, что когда электроны свободны...

Н. — ...тело становится проводником тока. Много ли свободных электронов в германии при нормальной температуре?



Л. — Нет, очень мало. Едва ли два электрона на 10 миллиардов (т. е. на 10^{10}) атомов. Это примерно такое соотношение, как если бы на удвоенное население земного шара был только один свободный человек.

Н. — Какая ужасная картина! Но если это так, то германий должен быть очень плохим проводником?

Л. — Да, и именно по этой причине его назвали полупроводником. Заметь, однако, что в одном грамме германия имеется десять тысяч миллиардов миллиардов (или 10^{22}) атомов, так что в нем содержится около двух тысяч миллиардов (или $2 \cdot 10^{12}$) свободных электронов. Это лучше, чем ничего... и такого количества достаточно, чтобы пропустить небольшой ток.

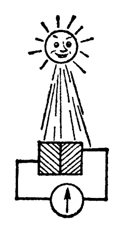
Н. — Ты говоришь мне о тысячах миллиардов электронов и утверждаешь, что ток небольшой!

Л. — Значит, ты, Незнайкин, забыл, что плотность тока в один ампер соответствует прохождению шести миллиардов миллиардов (или $6 \cdot 10^{18}$) электронов в секунду. Ты, конечно, поймешь, что наши несколько жалких тысяч миллиардов свободных электронов, разбросанных в колоссальной кристаллической решетке германия, могут создать только небольшую проводимость. Последняя обязана своим существованием тепловому движению и (обрати на это внимание) носит название с о б с т в е н н о й п р о в о д и м о с т и.

Н. — Одним словом, дело обстоит так, как если бы в нашем образцово организованном обществе изредка случались разводы и повторные браки, определяющие переходы из одной семьи в другую.

Л. — Это тоже правильно. А чтобы лучше использовать твое сравнение, скажем, что иногда там может, как пишут в романах, дуть «знойный ветер страстей», вызывающий большие потрясения.

Н. — Я догадываюсь, что ты хочешь сказать. Если повышать температуру кристалла германия, то тепловое движение, становясь быстрее, высвобождает большее количество электронов. Собственная проводимость в этом случае повышается. В отличие от того, что имеет место в проводниках, сопротивление полупроводников при повышении температуры уменьшается.



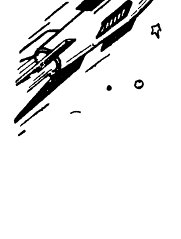
Л. — Ты хорошо рассудил, Незнайкин! Именно поэтому германий плохо работает при повышенных температурах. Нас в германии интересует не его собственная проводимость, потому что не ее используют в транзисторах. Кремний лучше выдерживает повышение температуры, так как его валентные электроны, находящиеся на третьей оболочке, крепче связаны

с ядром, чем валентные электроны германия, находящиеся на четвертой оболочке. Я добавлю, что можно также высвобождать электроны, воздействуя на атомы полупроводника не тепловой, а световой энергией.

Н. — Не хочешь ли ты сказать, что фотоны, эти зернышки света, бомбардируя атомы германия, вырывают из них электроны?

Л. — Да, и это свойство позволяет делать из германия ф о т о р е з и с т о р ы, т. е. устройства, сопротивление которых изменяется под воздействием освещения. В наиболее старом из известных фотоэлементов используется селен, который также является полупроводником.

Н. — Впрочем, я пользуюсь фотоэкспонометром, в котором установлен такой элемент...



Л. — Фотоэлемент в твоем экспонометре, очевидно, сделан не из селена, а, возможно, из кадмия или кремния. Эти вещества позволяют создавать генерирующие фотоэлементы, т. е. устройства, преобразующие световую энергию в электрический ток.

Н. — Не такие ли элементы, освещаемые солнцем, питают электрическим током космические станции?

СКАНДАЛ МНОГОЧИСЛЕННЫХ СЕМЕЙ

Л. — Да, Незнайкин. А теперь мы станем свидетелями смуты в нашем так хорошо организованном обществе, введя в него семью с пятью детьми.

Н. — Что ты хочешь этим сказать?

Л. — Что среди атомов даже самого чистого германия содержатся в самых малых количествах атомы других элементов, именуемых п р и м е с я м и. В самом чистом германии на миллиард атомов имеется один атом примеси.

Н. — Стоит ли обращать внимание на такую малость? Ведь это все равно, что их вообще нет.

Л. — Ты неправ, когда пренебрегаешь этими примесями, потому что даже при такой ничтожной пропорции в одном кубическом сантиметре германия, который называют ч и с т ы м, содержится пятьдесят тысяч миллиардов чужеродных или, как их называют, п р и м е с н ы х а т о м о в.

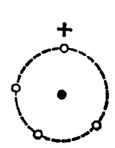
Н. — Я не подумал, что этот кубический сантиметр содержит тысячи миллиардов атомов... Но что делает семья с пятью детьми? Ты хочешь сказать, что речь идет об атоме с пятью электронами на внешней оболочке?



Л. — Совершенно верно. Один пятивалентный атом, например атом мышьяка или сурьмы, проник в благородное общество атомов германия (рис. 10)... и скандал разразился!

Н. — Очевидно, потому, что если удастся пережениить четырех детей этой странной семьи с детьми четырех соседних семей, то пятый остается безнадежным холостяком?

Л. — Да, Незнайкин, четыре электрона образуют валентные связи с четырьмя соседними атомами кристаллической решетки, а пятый электрон остается свободным.



Н. — Если я правильно понимаю, то, прилагая напряжение между двумя точками кристалла, можно создать там ток, ибо свободные электроны, появившиеся благодаря пятивалентным элементам, будут притягиваться положительным полюсом, а отрицательный полюс источника тока одновременно выпустит в кристалл такое же количество электронов (рис. 11).

Л. — Да, такое явление происходит в полупроводнике, содержащем пятивалентные примеси, т. е. примеси с избытком электронов. Говорят, что это полупроводник типа *n* (от слова negative — отрицательный). А такие примеси часто называются *донорами*, так как они дают свободные электроны.

Н. — Каково обычное содержание примесей?

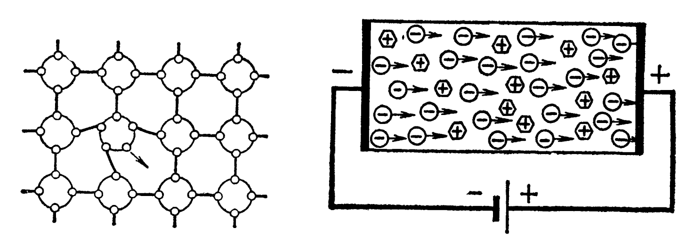


Рис. 10. Пятивалентный примесный атом нарушил безукоризненный порядок кристаллической решетки. Что станет с пятым электроном этого атома?

Рис. 11. Проводимость в полупроводнике типа *n*. Свободные электроны (помечены знаком минус) отрываются от пятивалентных атомов, которые из-за этого становятся положительными ионами (помечены знаком плюс).

Л. — Максимум один атом на десять миллионов атомов германия, т. е. такая же пропорция, как четыре человека на все население Франции.

Н. — Да, однако в этом случае мы получим примесей в сто раз больше, чем их содержится в самом чистом германии. Но что станет с атомом примеси, например мышьяка, у которого оторвался свободный электрон? По-моему, он перестанет быть нейтральным, и, имея теперь электронов меньше, чем протонов, станет положительным.

Л. — О, да. Как бы ни казался парадоксальным этот факт, а в германии типа *n* атомы примеси оказываются ионизированными положительно.

ИСТОРИИ С ПОХИЩЕНИЕМ ДЕТЕЙ

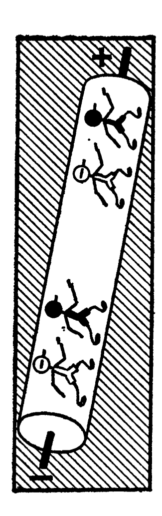


Н. — А что случится с нашим кристаллическим обществом, если одна из семей будет иметь лишь трех детей, иначе говоря, если в кристалл полупроводника ввести атомы, имеющие на внешней оболочке только три электрона?

Л. — Разразившийся скандал будет ничуть не меньше, чем в случае со слишком многочисленными семьями. Этот трехвалентный атом образует валентные связи с тремя соседними атомами, а в районе четвертого атома образуется брешь, или *дырка*, которую легко мог бы заполнить какой-нибудь посторонний электрон (рис. 12).

Н. — Короче говоря, эта семья с тремя детьми всемерно стремится усыновить четвертого, чтобы следовать традиции племени или, вернее, чтобы сообразоваться с его общей организацией. Но если она «позаимствует» этого ребенка у чужой семьи, то у последней в свою очередь образуется дырка.

Л. — Разумеется, и это движение заимствований или похищений детей может даже перемещаться с одного конца кристалла на другой.



Н. — Если, как я предполагаю, к кристаллу приложить напряжение.

Л. — Очевидно. Но проследи внимательно, что происходит в этом случае (рис. 13). Придя с той стороны, где находится

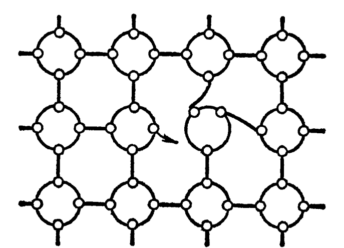


Рис. 12. Здесь в кристаллической решетке полупроводника имеется трехвалентный примесный атом, который стремится притянуть к себе электрон от соседнего атома.

отрицательный полюс, электрон заполнил дырку трехвалентного атома. Следовательно, электрон приблизился к положительному полюсу, тогда как новая дырка образовалась в соседнем атоме, расположенном ближе к отрицательному полюсу. Затем происходит это же явление. Новая дырка в свою

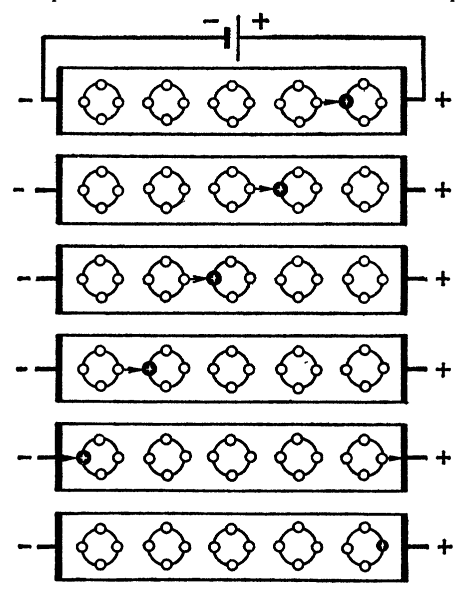
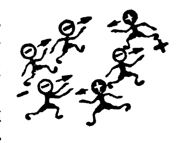


Рис. 13. В полупроводнике типа *p* трехвалентный примесный атом захватывает электрон соседнего атома полупроводника, оставляя там дырку, которая в свою очередь заполняется электроном, оторвавшимся от соседнего атома, и т. д.

очередь заполняется электроном, приблизившимся таким образом к положительному полюсу, а образовавшаяся за этот счет дырка оказалась еще ближе к отрицательному полюсу. И когда в итоге такого путешествия электрон достигает положительного полюса, откуда он направляется в источник тока, дырка достигает отрицательного полюса, где она заполняется электроном, поступившим из источника тока.

ДВА ПОТОКА

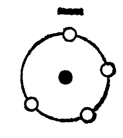


Н. — Значит, когда электроны, как им полагается, направляются к положительному полюсу, дырки перемещаются к отрицательному полюсу, как если бы они были частицами с положительными зарядами.

Л. — Да, действительно, все происходит так, как если бы в полупроводнике с трехвалентными примесями положительные заряды, противоположные электронам, перемещались от положительного полюса к отрицательному.

Н. — Таким образом, дырки следуют по условно принятому направлению электрического тока от положительного полюса к отрицательному, тогда как электроны движутся в обратном направлении. Но можно ли сказать, что здесь мы имеем электрический ток, созданный положительными зарядами?

Л. — А почему бы и нет? Не надо только забывать, что дырка представляет собой лишь свободное место, предназначенное для электрона.



Н. — Я предполагаю, что полупроводник, содержащий трехвалентные примеси, должен принадлежать к типу *p* (от слова positive — положительный).

Л. — Да, так его и называют. И раз уж ты сейчас в настроении серьезно поразмыслить, может быть, ты скажешь мне, что происходит с атомами примеси, когда электроны с соседних атомов заполняют их дырки.

Н. — Они становятся отрицательно заряженными ионами, потому что количество электронов стало больше количества их протонов... Весьма любопытно, что в полупроводнике типа *n* примеси ионизируются положительно, а в полупроводнике типа *p* — отрицательно.

Л. — Я добавлю, что атомы примесей типа *p*, такие как атомы алюминия, галлия или индия, часто называют а к ц е п т о р а м и, так как они принимают на себя электроны, тогда как атомы примесей типа *n* отдают их полупроводнику.

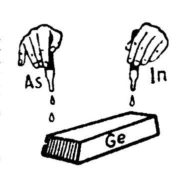
Н. — Я начинаю чувствовать, что в моей голове из всех этих доноров и акцепторов получается винегрет.

Л. — Поэтому я дам тебе маленькое мнемоническое правило: в слове «донор» есть буква эн (*n*), а в слове акцептор — буква пэ (*p*).

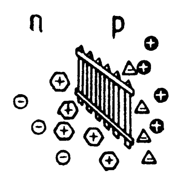
Н. — Спасибо, это несколько облегчит проблему.

ПЕРЕХОД, ПРЕДСТАВЛЯЮЩИЙ СОБОЙ БАРЬЕР

Л. — Раз ты уже знаешь нравы кристаллических обществ, спокойствие которых нарушается экстравагантными семьями доноров и акцепторов, рассмотрим теперь, что даст объединение полупроводника типа *n* с полупроводником типа *p*. Представь себе, что, взяв чистый кристалл германия, я одну половину его «отравил», введя атомы-доноры (например, атомы мышьяка), а в другую половину ввел атомы-акцепторы (индия, если хочешь). Зона разграничения между разными типами полупроводников носит название *p-n* п е р е х о д а. Его толщина порядка 0,3 *мкм*, но такая ничтожная протяженность зоны *p-n* перехода не мешает ей играть колоссальную роль.



Н. — Я не вижу в этом переходе ничего особенного. В каждой половине нашего кристалла электроны будут про-



должать свои короткие прогулки, совершенно не ведая, что происходит в его второй половине.

Л. — Ошибаешься, друг мой. Обычный тепловой ток в этом случае будет сопровождаться другим явлением. Отрицательно ионизированные примесные атомы области *p* оттолкнут от перехода свободные электроны в области *n*.

Н. — Правда, а я и не подумал об этом взаимном отталкивании одноименных зарядов... Но в этом случае положительно ионизированные атомы области *n* должны оттолкнуть от перехода дырки в области *p*.

Л. — Правильно, эти дырки (которые можно рассматривать как элементарные положительные заряды) отталкиваются. В действительности же положительные ионы области *n* притягивают электроны области *p* к переходу, в результате чего имеющиеся там дырки заполняются. Вырванные таким образом электроны оставляют дырки на удаленных от перехода атомах. Но все происходит так, как если бы дырки области *p* ушли от *p-n* перехода (рис. 14).

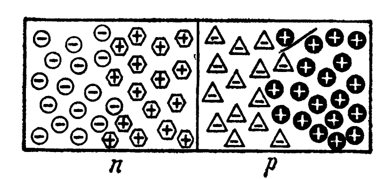
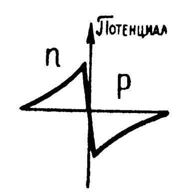


Рис. 14. Переход *p-n*. Дырки области *p* отталкиваются от перехода, оставляя возле него отрицательные ионы акцепторной примеси. Точно так же свободные электроны области *n* отталкиваются от перехода, оставляя возле него положительные ионы донорной примеси. Запомните хорошенько принятые здесь четыре условных обозначения, так как они используются на следующих рисунках.

Н. — Значит, в прилегающем к переходу пространстве области *p* все атомы-акцепторы будут заполнены, т. е. ионизированы отрицательно. Точно так же в области *n* все атомы-доноры вблизи перехода потеряют по электрону, что сделает их положительными ионами. В то же время свободные носители электрических зарядов (электроны и дырки) в области *p-n* перехода отсутствуют, так как заряды ионов примесей оттолкнули их отсюда к краям кристалла. Все это очень любопытно; наш переход превращается в своего рода барьер между двумя областями, из которых одна с отрицательным, а другая с положительным потенциалом.

Л. — Да, ты очень хорошо рассудил: переход представляет собой настоящий п о т е н ц и а л ь н ы й б а р ь е р. В этом тончайшем слое полупроводника потенциал ионизированных атомов резко переходит от положительного значения (в области *n* — не забудь этого!) к отрицательному (в области *p*). Но в общей сложности кристалл остается нейтральным, так как в целом положительные и отрицательные заряды уравновешивают друг друга. Создав в полупроводнике области типа *p* и типа *n*, мы просто вызвали перемещение подвижных зарядов в оба конца каждой области, тогда как в отсутствие *p-n* перехода заряды распределяются равномерно по всему кристаллу.



Н. — Все это представляется мне совершенно ясным, но какая нам польза от этого перехода с его потенциальным барьером?

Л. — Ты сразу же ее обнаружишь, если приложишь к *p-n* переходу напряжение.

ЭЛЕКТРОНЫ И ДЫРКИ НА ПРОГУЛКЕ

Н. — Я предполагаю, что мы получим ток, образуемый свободными электронами области *n* и дырками области *p*, причем одни движутся в одну, а другие — в обратную сторону.

Л. — Сказанное тобой может быть правильно, но ты слишком спешишь. Сначала необходимо рассмотреть порознь, что происходит в нашем полупроводнике с *p-n* переходом при одной и другой полярности приложенного напряжения. Первоначально допустим, что положительный полюс источника напряжения соединен с областью *p*, а отрицательный полюс — с областью *n* (рис. 15).

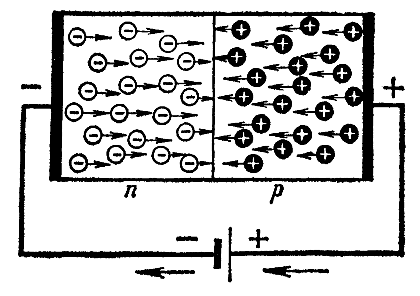
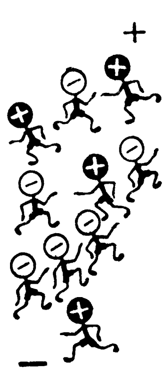


Рис. 15. Прохождение тока через *p-n* переход. На рисунке обозначены только носители зарядов: электроны (помечены знаком минус) и дырки (помечены знаком плюс), а доноры области *n* и акцепторы области *p* для большей ясности опущены.

Н. — Хорошо. В области *n* свободные электроны полупроводника будут отталкиваться в сторону перехода электронами, поступающими из источника напряжения. Они пересекут переход и примутся заполнять дырки, которые положительный потенциал источника подогнал к этому переходу.



Л. — Чтобы быть более точными, скажем, что положительный полюс источника будет притягивать к себе электрон каждый раз, когда другой электрон преодолеет переход, перепрыгнув из области *n* в область *p*. Электрон, притянутый источником, создает дырку, которая будет заполнена электроном, расположенным ближе к переходу, на месте электрона возникнет дырка и т. д., дырка будет перемещаться в сторону перехода, пока она не будет заполнена там новым электроном, пришедшим из области *n*.

Н. — Следовательно, я был абсолютно прав, когда сказал, что возникает ток, образуемый электронами и дырками, перемещающимися в противоположных направлениях.

Л. — Да, это правильно, когда напряжение прикладывают, как мы это сейчас сделали, в прямом направлении, т. е. присоединяют положительный полюс источника к области *p*, а отрицательный полюс — к области *n*. Но если приложить напряжение в обратном направлении, то результат будет иным (рис. 16).

Н. — Почему же? Электроны отрицательного полюса источника притянут дырки области *p* ближе к концу кристалла полупроводника. А к другому концу кристалла положительный

потенциал источника притянет свободные электроны. Вот неожиданность!.. Ведь при этом ни электроны, ни дырки не будут пересекать переход, а потенциальный барьер только увеличится, значит, никакого тока мы не получим!

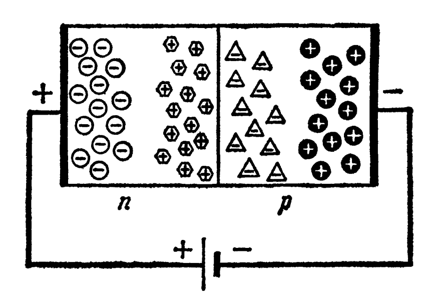
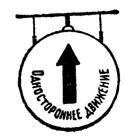


Рис. 16. Прилагая к *p-n* переходу обратное напряжение, мы лишь оттягиваем электроны и дырки от границы раздела двух областей. Таким образом, «потенциальный барьер», высота которого повышается, препятствует прохождению тока.



Л. — Не я заставлял тебя говорить это. Ты сам видел, что ток может установиться только при приложении прямого напряжения, когда положительный полюс соединяется с областью *p*, а отрицательный с областью *n*. Но если ты поменяешь полярность, то тока не будет или же будет только чрезвычайно малый о б р а т н ы й т о к (рис. 17).

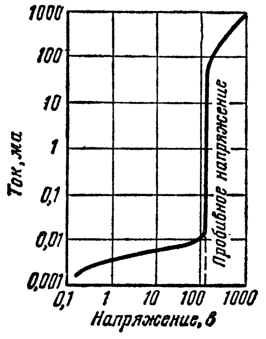


Рис. 17. Зависимость обратного тока через *p-n* переход от приложенного напряжения. Внимание: кривая приведена не в линейном, а в логарифмическом масштабе.

Н. — Даже если приложить высокое напряжение?

Л. — Даже и в этом случае, но до известного предела. Если ты превысишь этот предел, то потенциальный барьер будет прорван и электроны устремятся вперед лавиной: ток мгновенно станет большим. Это явление аналогично электрическому пробою изоляции, и напряжение, при котором оно происходит, называют п р о б и в н ы м н а п р я ж е н и е м *p-n* перехода. Это явление в некоторых случаях применяется в электронике, но мы не будем прибегать к его помощи. И для нас переход останется проводником в прямом направлении и практически изолятором в обратном направлении.

ОБЯЗАТЕЛЬНОЕ ОДНОСТОРОННЕЕ ДВИЖЕНИЕ

Н. — Но тогда переход, проводящий только в одном направлении, представляет собой настоящий выпрямитель?

Л. — Да, тысячу раз да, дорогой Незнайкин. Если ты приложишь к нему переменное напряжение, то ток пойдет во

время одного полупериода, когда напряжение окажется прямым, но не пойдет во время другого полупериода при обратной полярности напряжения (рис. 18).

Н. — Как через любой диод?

Л. — Совершенно верно. И именно по этой причине *p-n* переход называют полупроводниковым диодом

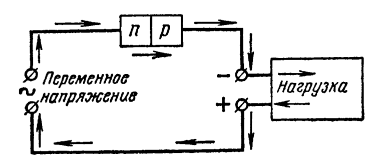


Рис. 18. Диод с *p-n* переходом может служить выпрямителем, так же как и вакуумный диод, но в отличие от последнего он не требует напряжения накала! На нашем рисунке показан однополупериодный выпрямитель.



Рис. 19. Условное обозначение полупроводникового диода выбрано с учетом условного направления тока от положительного полюса к отрицательному, которое, однако, не соответствует истинному направлению движения электронов.

(рис. 19). Как и любой другой диод, он может служить детектором (рис. 20). Он прекрасно выполняет функции детектора, а на очень высоких частотах — даже лучше, чем вакуумные диоды.

Н. — А можно ли также использовать переходы в качестве выпрямителей относительно больших токов, например вместо кенотронов, выпрямляющих анодное напряжение?

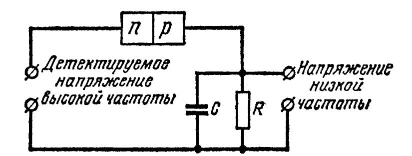


Рис. 20. Диод с *p-n* переходом используется в качестве детектора. Детектирование напряжения выделяется на резисторе *R*, причем высокочастотные пульсации сглаживаются конденсатором *C*.

Л. — Это широко распространено. Кремниевые, купроксные или селеновые выпрямители с успехом заменяют вакуумные вентили, причем обладают еще и рядом преимуществ: они прочнее, экономичнее, а их срок службы значительно больше.

Н. — Если это так, то я без колебаний провозглашу: «Да здравствуют полупроводники!»

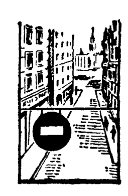
БЕСЕДА ТРЕТЬЯ

ДОБРЫЙ ДЕНЬ, ТРАНЗИСТОР!

Разобрав в предыдущей беседе свойства переходов, наши два друга приступают здесь к изучению транзистора, у которого при первом же знакомстве обнаруживаются глубокое сходство и не менее глубокое различие с электронной лампой. Любознайкин и Незнайкин разбирают сущность процесса усиления транзистора и делают интересные наблюдения относительно входного и выходного сопротивлений транзистора.

Содержание: Транзисторы структур *p-n-p* **и** *n-p-n*. **Ток покоя. Ток базы. Транзисторный эффект. Усиление тока. Аналогия лампа — транзистор. Входное и выходное сопротивления. Усиление напряжения. Питание транзистора.**

ГЛУПАЯ ШУТКА



Любознайкин. — Здравствуй, Незнайкин! Почему ты опоздал и почему у тебя такой разъяренный вид?

Незнайкин. — Есть отчего... Знаешь ли ты, что на вашу улицу нельзя больше проехать на автомобиле?

Л. — На ней одностороннее движение, но достаточно выехать из нее в разрешенном направлении, чтобы...

Н. — Нет больше разрешенного направления! Эти регулировщики, которые, несомненно, считают себя большими остряками, повесили и на другом конце знак «Въезд запрещен», так что теперь въезд на вашу улицу закрыт с обеих сторон.

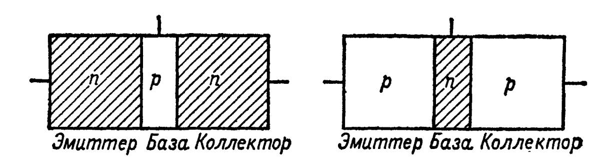


Рис. 21. Два основных вида транзисторов: *n-p-n* и *p-n-p*.

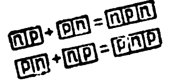
Л. — Ну, это может быть, просто шутка одного из тех, которому надоел шум автомобилей... и теперь мы в тишине сможем наконец рассмотреть принцип работы транзистора.

Н. — Я горю от нетерпения узнать, как устроено это «трехлапое создание».

Л. — Ну, в этом нет ничего сложного. Транзистор состоит из двух противоположно направленных *p-n* переходов. Можно, например, объединить два *p-n* перехода таким образом, что их область *p* окажется общей; в результате получим транзистор структуры *n-p-n* (рис. 21).

Н. — Я думаю, что точно так же от объединения области *n* двух *p-n* переходов мы получим транзистор структуры *p-n-p*.

Л. — Естественно. Я добавлю, что одна из внешних областей называется эмиттером, а другая — коллектором, средняя же область, которая должна быть очень тонкой (и я прошу тебя обратить на это условие особое внимание), называется базой.



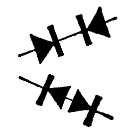
Н. — Одним словом, транзистор представляет собой своеобразный бутерброд из двух толстых кусков хлеба, между которыми положен тоненький кусочек ветчины.

Л. — Да, если хочешь.

Н. — Но позволь мне сказать, что твой бутерброд так же несъедобен, как недоступна для машин ваша улица.

НЕПРОНИЦАЕМЫЙ БУТЕРБРОД

Л. — На что ты намекаешь, уважаемый друг?



Н. — Очень просто: два направленных в противоположные стороны перехода закрывают путь току в обоих направлениях точно так же, как и два знака «Въезд запрещен» лишают возможности выехать на вашу улицу, с какой бы стороны ты ни пытался это сделать.

Л. — Твои рассуждения не лишены логики. В заключение ты, может быть, заподозришь меня в авторстве этой глупой шутки, которую я якобы сделал с единственной целью облегчить тебе понимание принципа работы транзистора?.. Дело

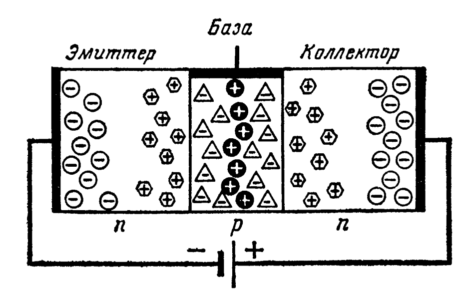
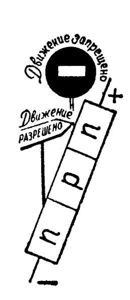


Рис. 22. Потенциальные барьеры, созданные в транзисторе своеобразным размещением электронов, дырок, положительных ионов (доноров) и отрицательных ионов (акцепторов).

заключается в том, что если прикладывать напряжение к транзистору между эмиттером и коллектором, то при любой полярности один из переходов окажется в прямом, а другой в обратном направлении и будет препятствовать прохождению тока (рис. 22).



Н. — Например, если к транзистору *n-p-n* мы приложим напряжение так, чтобы слева был отрицательный, а справа положительный полюс, то первый переход (*n-p*) свободно пропустит электроны слева направо. Но второй переход (*p-n*) решительно закроет им дорогу. Однако не найдется ли, тем не менее, нескольких шустрых электронов, которым, несмотря на все, удастся циркулировать в цепи?

Л. — Да, такие электроны всегда имеются. Они проложат себе дорогу благодаря тепловому воздействию, которое поможет им преодолеть *p-n* переход. Эти циркулирующие элек-

троны образуют то, что называется **начальным током**, или **током насыщения**[1].

Н. — Чем вызвано последнее название? Может быть, этот ток так велик?

Л. — Напротив, он чрезвычайно мал. Но он практически не зависит от величины приложенного напряжения. Повысь напряжение, а ток останется почти таким же. Под «насыщением» в данном случае понимают, что все свободные электроны, способные при данной температуре преодолеть потенциальный барьер, участвуют в образовании тока.

Н. — А если температура повысится...

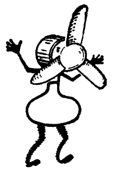
Л. — ...величина тока насыщения также возрастет. Впрочем, может случиться, что при высоком напряжении выделяемая этим током мощность вызовет дополнительное нагревание переходов, которое повлечет за собой дальнейшее увеличение тока...

Н. — ...что в свою очередь повысит температуру переходов и т. д.

Л. — Да. В этом случае говорят о наступлении тепловой нестабильности, которая может привести к разрушению транзистора (так называемому **тепловому пробою**). Поэтому при повышенной температуре не следует прилагать к транзистору чрезмерных напряжений. Следует также заботиться об отводе тепла.

Н. — Я обещаю тебе установить вентиляторы в моей аппаратуре на транзисторах... Однако пока я не вижу пользы от этих полупроводниковых бутербродов.

В ОСНОВЕ ВСЕГО... БАЗА



Л. — Это потому, что ты пока не добрался до ветчины... я хочу сказать — до тонкой средней области, находящейся

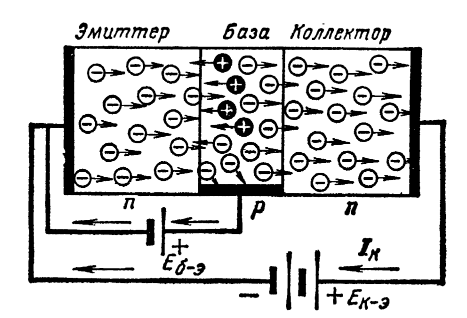


Рис. 23. Создавая поток электронов из эмиттера в базу, источник напряжения $E_{б\text{-}э}$ открывает им дорогу через коллектор.

между обоими переходами, которую мы назвали базой. Приложим теперь в прямом направлении небольшое напряжение между эмиттером и базой (рис. 23).

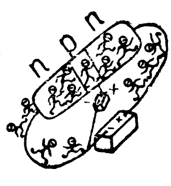
---

[1] В этом месте Любознайкин допускает неточность. Ток насыщения, о котором идет речь ниже, проходит при приложении обратного напряжения только к одному *p-n* переходу, т. е. между средним выводом транзистора (базой) и одним из крайних. *Прим. ред.*

Н. — Ты хочешь сказать, что если мы возьмем транзистор структуры *n-p-n*, то его эмиттер надо сделать отрицательным по отношению к базе?

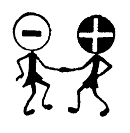
Л. — Совершенно верно. Что, по твоему мнению, произойдет в этом случае?

Н. — Ничего особенного. Напряжение приложено в прямом направлении — значит, через переход между эмиттером и базой пойдет ток, вот и все.



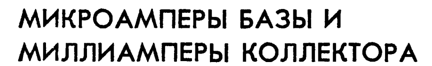
Л. — Нет, далеко не все. Ток внесет в базу (область *p*) свободные электроны из эмиттера, который состоит из полупроводника типа *n*. А так как база тонкая, то лишь небольшого количества этих электронов хватит для заполнения дырок, находящихся в области *p*. При этом в соответствии с механизмом, который мы рассмотрели в прошлый раз, через вывод базы будет выходить небольшой ток базы $I_б$. Большинство же проникших в базу электронов продолжит свое движение и проникнет в коллектор, откуда они будут извлечены куда более высоким потенциалом источника напряжения $E_{к-э}$. Следовательно, они преодолеют потенциальный барьер второго перехода и, пройдя через коллектор и источник $E_{к-э}$, вернутся к эмиттеру.

Н. — Удивительно! Если я правильно понял, то достаточно приложить небольшое напряжение между базой и эмиттером, чтобы открыть электронам путь через второй переход база — коллектор, который в обычных условиях стоит перед ним в обратном направлении.



Л. — Да, Незнайкин. Именно в открывании запертого обратным напряжением второго перехода заключается т р а н з и с т о р н ы й э ф ф е к т.

Н. — Я думаю, что дело станет для меня яснее, если ты назовешь мне порядок величин используемых напряжений и токов.



МИКРОАМПЕРЫ БАЗЫ И МИЛЛИАМПЕРЫ КОЛЛЕКТОРА

Л. — Между базой и эмиттером обычных маломощных транзисторов прикладывают напряжение порядка 0,2 *в*. При этом в цепи базы проходит ток в несколько десятков микроампер. Напряжение же, прикладываемое между коллектором и эмиттером, может составлять 5—10 *в* и больше. Ток коллектора бывает от 0,5 *ма* до нескольких миллиампер.

Н. — Одним словом, эмиттер впрыскивает в базу некоторое количество электронов, небольшая часть которых сразу же возвращается к эмиттеру через источник напряжения $E_{б-э}$ (это те электроны, которые во время своего короткого пробега по базе имели несчастье повстречаться с дырками), но большая часть электронов продолжает свой путь, они пересекают второй переход, входят в коллектор и возвращаются к эмиттеру через источник напряжения $E_{к-э}$. Я уже догадался, что усилительное действие транзисторов заключается в том, что ток коллектора значительно больше тока базы.



Л. — Ты несколько спешишь, но ты не ошибаешься. Усиление заключается в том, что ток коллектора зависит в основном от тока базы и меняется пропорционально изменениям последнего. Вообще ток коллектора в несколько десятков раз больше тока базы. Вот, например, график, показывающий, как изменяется ток коллектора в зависимости от тока базы для одного из транзисторов (рис. 24). Будь внимателен,

Незнайкин! Ток базы выражен здесь в *микроамперах*, а ток коллектора — в *миллиамперах*. Проявив достаточную наблюдательность, ты заметишь, что ток коллектора за вычетом началь-

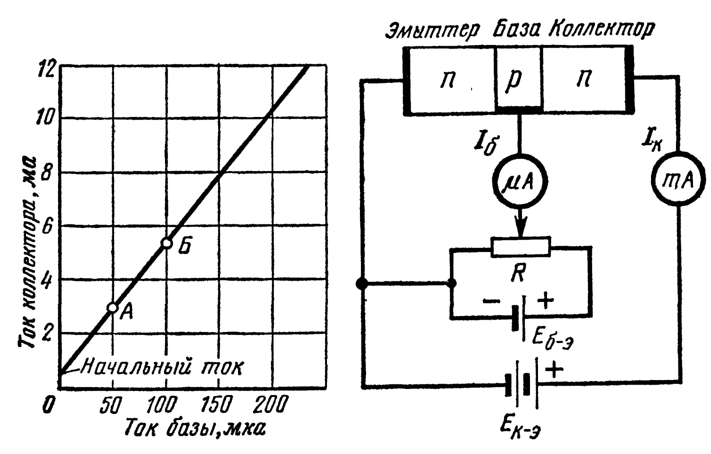
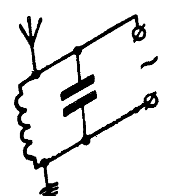


Рис. 24. Зависимость тока коллектора $I_к$ (в миллиамперах) от тока базы $I_б$ (в микроамперах). Между точками *А* и *Б* ток базы увеличивается от 50 до 100 *мка*, т. е. на 50 *мка*, или 0,05 *ма*. Ток коллектора между этими же точками возрастает от 3 до 5,5 *ма*, т. е. на 2,5 *ма*. Следовательно, усиление по току составляет 2,5 : 0,05 = 50 раз.

Рис. 25. Схема, при помощи которой можно снять характеристику, изображенную на рис. 24. При каждом положении движка потенциометра *R* измеряются значения тока базы и тока коллектора.



ного тока, существующего в отсутствие тока базы, всюду в 50 раз больше тока базы. В этом случае говорят, что у с и л е н и е   п о   т о к у равно 50.

Н. — А как строится такой график?

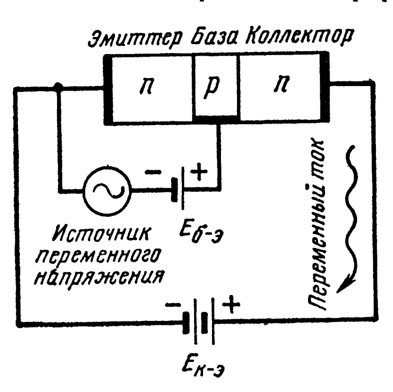
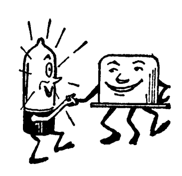


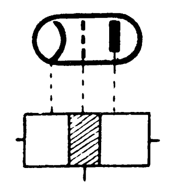
Рис. 26. Между базой и эмиттером приложено переменное напряжение. Сразу же появляется переменная составляющая тока в цепи коллектора.

Л. — Очень просто. Изменяя при помощи потенциометра прикладываемое между базой и эмиттером напряжение (рис. 25), надо измерять соответствующие друг другу значения тока базы (микроамперметром) и тока коллектора (миллиамперметром).



Н. — Любознайкин, у меня есть одна идея. Вместо того чтобы крутить ручку потенциометра и изменять тем самым напряжение между эмиттером и базой, давай приложим последовательно с источником постоянного напряжения $E_{б-э}$ какой-нибудь сигнал, например высокочастотное напряжение из антенны или низкочастотное напряжение, получаемое после детектирования (рис. 26). Вызывая таким образом небольшие изменения тока базы, мы получим значительные изменения тока коллектора.

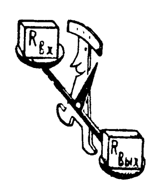
СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ



Л. — Браво, Незнайкин! Как ты додумался до такой блестящей идеи?

Н. — Видишь ли, мне в этот момент представилась аналогия между транзистором и электронной лампой. Вот, например, база, ведь она удивительно похожа на сетку. Так же как и сетка, она размещена между эмиттером и коллектором, будто между катодом (он ведь тоже эмиттирует электроны) и анодом (а он-то их собирает). И так же как небольшие изменения потенциала сетки вызывают значительные изменения анодного тока, здесь слабые изменения напряжения в цепи базы создают значительные изменения тока коллектора. Ура! Я понял суть транзистора! Разве я не один из ясновидцев?

Л. — По правде говоря, триумф твой весьма скромен. Я рискую обдать твой юношеский энтузиазм холодным душем: я должен сказать, что аналогия лампа — транзистор хоть и облегчает понимание некоторых явлений, но имеет свои ограничения, о которых не следует забывать.



Н. — Я не вижу существенной разницы.

Л. — Для начала имеется одна, и весьма существенная: наличие тока базы. Вспомни, как при использовании ламп мы тщательно стараемся предотвратить возникновение сеточного тока.

Н. — Правильно. Мы подаем на сетку отрицательное смещение, чтобы помешать ей становиться положительной при пиках положительных значений сигнала, что сделало бы ее конкуренткой анода и она стала бы захватывать электроны.

Л. — Поэтому входной сигнал у лампы представляет собой напряжение, которое практически не создает никакого тока, а следовательно, здесь нет и расхода мощности. В транзисторе же напряжение входного сигнала вызывает соответствующий ток, а значит, надо говорить и о затрате мощности.

Н. — Должен ли я сделать из этого вывод, что у транзистора промежуток эмиттер — база имеет входное сопротивление и, вероятно, малое?

Л. — Разумеется. Входное сопротивление составляет всего каких-нибудь несколько сотен ом, тогда как сопротивление между катодом и сеткой вакуумной лампы практически бесконечно большое. У мощных же транзисторов это сопротивление составляет несколько ом или десятков ом. А вот в ы х о д н о е с о п р о т и в л е н и е транзистора, напротив, довольно высокое и может достигать нескольких десятков тысяч ом.



Н. — Ясно. Ведь к переходу эмиттер — база напряжение прикладывают в прямом направлении, что снижает сопротивление, а к переходу база — коллектор — в обратном направлении, что должно сделать его сопротивление весьма высоким. Любопытно, что выходное сопротивление у транзистора получается того же порядка, что у электронных ламп [1].

Л. — Как видишь, Незнайкин, не следует без особой необходимости и не сделав соответствующих оговорок прибегать к аналогии лампа — транзистор. А так как мы приступили к основному вопросу — о входном и выходном сопротивлениях, ты легко поймешь, как происходит в транзисторе усиление по напряжению.

УСИЛЕНИЕ ПО НАПРЯЖЕНИЮ

Н. — Я предполагаю, что небольшое переменное напряжение, приложенное между базой и эмиттером, определяет, как мы уже говорили, изменение тока базы.

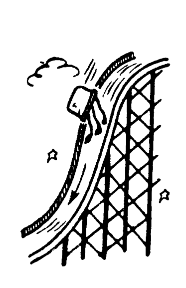
Л. — И эти изменения будут тем больше, чем меньше входное сопротивление (если источник напряжения сам имеет малое внутреннее сопротивление).

Н. — Это я понимаю, так как в голове у меня постоянно сидит закон Ома, по которому ток будет тем больше, чем меньше сопротивление.



Л. — Однако ток коллектора изменяется пропорционально току базы. Следовательно, он тоже будет претерпевать значительные изменения. Но поскольку выходное сопротивление транзистора велико, мы без осложнений можем пропускать ток коллектора через большое сопротивление нагрузки...

Н. — ...на котором мы выделим значительно усиленные переменные напряжения. Если память мне не изменяет, у электронных ламп отношение изменения анодного тока, к вызвавшему его изменению напряжения на сетке называется крутизной. Можно ли в царстве транзисторов применять это же понятие? В этом случае крутизной было бы отношение изменения тока коллектора к изменению напряжения базы.



Л. — Да, Незнайкин. Часто говорят о крутизне транзистора, и мы еще будем иметь случай более детально рассмотреть это понятие. Уже сейчас я могу сказать тебе, что крутизной 30 *ма/в* (при питании цепи коллектора током в 1 *ма*) никого не удивишь.

Н. — Но это здорово! С такой крутизной, очевидно, можно получать колоссальные усиления.

Л. — Увы! Нет. Как ты вскоре увидишь, низкое входное сопротивление лишает нас части преимуществ этой высокой

---

[1] Сопротивления, о которых говорит Любознайкин, рассчитываются путем деления малых изменений напряжений на вызываемые ими изменения тока.

Следовательно, входное сопротивление

$$r_{вх} = \frac{\Delta U_б}{\Delta I_б},$$

где $\Delta U_б$ — малое изменение напряжения между эмиттером и базой, а $\Delta I_б$ — возникающее в результате этого изменение тока базы.

Точно так же выходное сопротивление

$$r_{вых} = \frac{\Delta U_к}{\Delta I_к},$$

где $\Delta U_к$ — изменение напряжения, приложенного между коллектором и эмиттером, а $\Delta I_к$ — соответствующее изменение тока коллектора.

крутизны. Кроме того, ты понимаешь, что необходимо ограничивать амплитуду усиливаемых переменных напряжений.

Н. — В электронных лампах следует избегать, чтобы сетка стала положительной. Здесь же, как я думаю, нужно избегать обратного явления, чтобы пики отрицательных полупериодов не сделали эмиттер положительным по отношению к базе, т. е. не заперли бы эмиттерный переход.

Л. — Правильно. А кроме того, не следует также допускать, чтобы положительный пик на базе вызвал столь большое увеличение тока коллектора, что величина последнего ограничится падением на нагрузочном резисторе всего напряжения батареи $E_{к\text{-}э}$ [1].

Н. — А нельзя ли для устранения этих опасностей повысить напряжения обеих батарей?

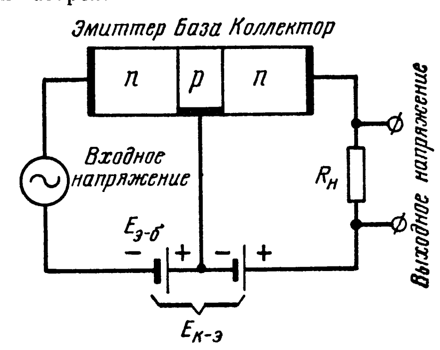
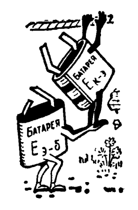
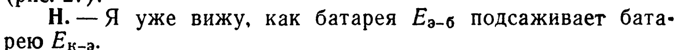


Рис. 27. Два источника напряжения (для цепи базы и для цепи коллектора) могут быть заменены одним источником с отводом (вместо отвода от батареи можно применить делитель напряжения из двух резисторов). На нашем рисунке показано также место включения нагрузочного резистора $R_н$, на котором выделяется усиленное выходное напряжение.

Л. — В некоторых случаях это может привести к неприятностям, так как для каждого типа транзистора существуют максимально допустимые значения постоянных напряжений, которые нельзя превышать. Однако тут же я хочу сказать тебе, что оба источника напряжения с выгодой для дела можно соединить последовательно, потому что нужно подать на коллектор напряжение еще более положительное, чем напряжение базы по отношению к напряжению эмиттера (рис. 27).

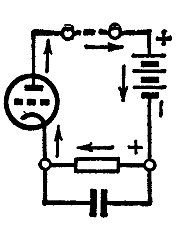




Н. — Я уже вижу, как батарея $E_{э\text{-}б}$ подсаживает батарею $E_{к\text{-}э}$.

Л. — В действительности обходятся вовсе без первой батареи, а смещение на базе получают автоматически с помощью резисторов, присоединенных к источнику $E_{к\text{-}э}$ и резистора, введенного в цепь эмиттера.

Н. — Это так, как делают в ламповых схемах, где через резистор сеточного смещения проходит анодный ток?



Л. — Почти. Но подробнее этот вопрос мы рассмотрим дальше. А пока в качестве упражнения я прошу тебя продумать к нашей следующей встрече, каким образом ведет себя другой (и надо сказать, значительно более распространенный) тип транзистора, а именно транзистор структуры *p-n-p*.

Н. — Сколько бессонных ночей ждет меня!

⊚

[1] Все эти рассуждения касаются транзистора структуры *n-p-n*. Для транзисторов структуры *p-n-p* полярности всех напряжений обратные. *Прим. ред.*

БЕСЕДА ЧЕТВЕРТАЯ

ФИЗИКА ТРАНЗИСТОРОВ

Во время трех первых бесед Любознайкин и Незнайкин рассмотрели физические основы транзисторов. Для этого они изучили внутреннюю структуру отдельно взятого атома, а затем поведение атома в кристаллической решетке. Наши друзья увидели, какие нарушения в коллективе атомов вызывает введение примесей. И, наконец, комбинируя области полупроводникового материала с противоположными типами проводимости, наши друзья получали диоды и транзисторы.

Для лучшего усвоения всего этого полезно подробнее рассмотреть некоторые детали уже затронутых раньше вопросов. Это и явится предметом данной беседы.

Содержание: Движение зарядов. Основные носители. Принцип работы транзистора структуры *p-n-p*. **Интерметаллические соединения. Обозначение выводов. Условные обозначения транзистора. Краткое изложение основных понятий.**

ЧЕТЫРЕ ТИПА ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ

Незнайкин. — Твои полупроводники, Любознайкин, заставили меня провести не одну бессонную ночь. Это увлекательно..., но дьявольски сложно!

Любознайкин. — Должен ли я прописать тебе снотворное, или ты предпочитаешь, чтобы я осветил те вопросы, которые кажутся тебе непонятными?

Н. — Я предпочел бы получить ответы на мучающие меня вопросы. Видишь ли, характер некоторых явлений мне трудно понять из-за наличия в полупроводниках четырех типов заряженных частиц:

1) ионизированных атомов доноров, которые, потеряв пятый электрон со своей внешней оболочки, стали положительными;

2) освобожденных таким образом электронов, имеющих отрицательный заряд;

3) ионизированных атомов акцепторов, которые, захватив электрон у соседнего атома, чтобы довести количество электронов на своей внешней оболочке до четырех, стали отрицательными;



4) и, наконец, дырок, появившихся в результате таких захватов и представляющих собой недостаток электрона, а потому имеющих положительный заряд.

Л. — Ты хорошо изложил положение, существующее в полупроводнике. Что же тебя беспокоит?

Н. — Вопрос движения зарядов. Ты сказал мне, что в полупроводнике электрический ток создается одновременно потоком электронов, идущих от отрицательного полюса к положительному, и перемещением дырок, двигающихся в обратном направлении от положительного полюса к отрицательному. Этим полупроводники отличаются от металлов, в которых электропроводность создается только движением электронов.

Л. — Совершенно верно. К этому следует еще добавить, что и движение дырок в конечном счете обусловливается перемещением электронов.

Н. — Но я не понимаю, почему ионизированные атомы, как доноры, так и акцепторы, сами не участвуют в движении электрических зарядов.

Л. — Я вижу, что тебя мучает, и ты бесспорно прав, задав этот вопрос. Однако это довольно просто: ионы не могут перемещаться, потому что они входят в состав кристаллической решетки и прочно привязаны к своим местам. До тех пор, пока тело остается твердым, его атомы остаются пленниками невидимых связей, которые удерживают их на месте. В жидкостях, в отличие от твердых тел, ионизированные атомы свободно перемещаются и при приложении внешнего напряжения создают ионную проводимость, называемую явлением электролиза, о котором тебе, бесспорно, говорили в школе на уроках физики.

Н. — Прекрасно, сказанное тобой доставляет мне удовольствие. Отныне в своих рассуждениях я буду вправе не принимать в расчет ионизированные атомы и заниматься только электронами и дырками.

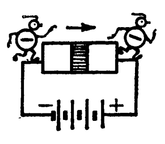
Л. — Это вполне законно, и я добавлю, что мы должны быть счастливы, что ионы в полупроводниках не перемещаются. В противном случае проводимость различных областей транзистора с течением времени могла бы изменяться, что сократило бы продолжительность его службы. Что касается электронов, то они непрерывно обновляются, потому что источник напряжения инъецирует их с одной стороны и отбирает с другой, что порождает новые дырки. Это означает, что мы не обнаружили никаких обстоятельств, ограничивающих срок службы транзисторов.



ЭЙНШТЕЙН БЫЛ ПРАВ

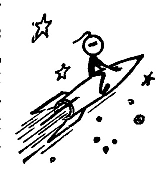
Н. — Чудесно, но поговорим еще об электронах и дырках. Я хотел бы знать, как они сосуществуют, не нейтрализуя друг друга. Ведь разноименные заряды взаимно притягиваются.

Л. — Подумай, Незнайкин, о колоссальных расстояниях (разумеется, в атомных масштабах), которые разделяют большинство этих частиц. Электрону удается пробежать путь, во много сотен раз превышающий расстояние между атомами. В человеческих масштабах в среднем это всего лишь десять тысячных миллиметра, но для электрона это космические расстояния. Ты понимаешь, что в этих условиях он не имеет чрезмерных шансов встретить дырку, и в действительности электроны и дырки всегда сосуществуют.



Н. — Да, ты мне объяснил, что даже при нормальной температуре имеется известное тепловое движение, отрывающее электроны у многих атомов, чтобы бросить их в межатомное пространство.

Л. — В кубическом сантиметре «чистого» германия при обычной температуре имеется около двадцати пяти тысяч миллиардов свободных электронов, и, естественно, столько же дырок, так как место, оставленное электроном, не что иное, как дырка. Эти пары носителей зарядов после определенной продолжительности жизни рекомбинируют, но все время создаются и новые пары. Так что в кристалле удерживается статистическое равновесие процессов генерации и рекомбинации пар электрон — дырка.



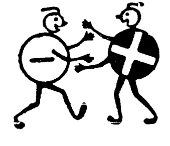
Н. — А если германий не «чистый»? Если мы, например, введем в него примеси типа *n*?

Л. — В этом случае свободных электронов будет больше, чем дырок. Поэтому в материале типа *n* электроны называются о с н о в н ы м и н о с и т е л я м и зарядов.

Н. — Я догадываюсь, что в полупроводнике типа *p* более многочисленны дырки, и потому здесь они должны считаться основными носителями... Эйнштейн решительно был прав: все относительно.

ТРАНЗИСТОР СТРУКТУРЫ *p-n-p*

Л. — Теперь, когда я удовлетворил твое любопытство, не можешь ли ты в свою очередь ответить мне на вопрос, который я задал в конце нашей прошлой беседы: как работает транзистор структуры *p-n-p* (рис. 28)?



Н. — Я думал об этом, и мне кажется, что я могу тебе ответить. В таком транзисторе в отличие от транзистора структуры *n-p-n* коллектор нужно сделать отрицательным по отношению к эмиттеру. Я должен тебе признаться, что это мне очень неприятно.

Эмиттер База Коллектор

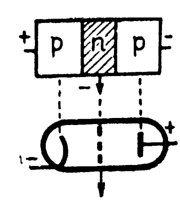
p *n* *p*

Рис. 28. Распределение носителей зарядов (электронов и дырок) и ионизированных атомов в транзисторе структуры *p-n-p* до включения напряжений питания. На рисунке видны потенциальные барьеры, образованные ионами с разноименными зарядами.

Л. — Почему же?

Н. — Потому что я всегда стремлюсь сравнивать транзистор с электронной лампой, и идея сделать анод отрицательным по отношению к катоду (ведь именно их роль выполняют соответственно коллектор и эмиттер) меня несколько разочаровывает. Тот же факт, что база должна быть отрицательной по отношению к эмиттеру, радует мое сердце, так как я думаю, разумеется, о сетке.

Л. — Незнайкин, остерегайся таких сопоставлений, я уже говорил тебе об этом.



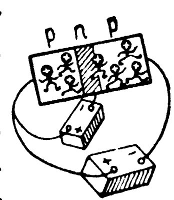
Н. — Как бы там ни было, но при таком распределении напряжений переход эмиттер — база питается в проводящем направлении. Это значит, что отталкиваемые положительным полюсом источника питания дырки эмиттера неудержимо устремляются через *p-n* переход в базу. Благодаря малой толщине базы большинство дырок успеет проскочить через нее и проникнет в коллектор, не прореагировав на слабое напряжение отрицательного полюса батареи $E_{б\text{-}э}$.

Л. — Это совершенно верно. Однако, что происходит с теми немногочисленными дырками, которые, как ты говоришь, прореагируют на притяжение отрицательного полюса батареи $E_{б\text{-}э}$ (рис. 29)?

Н. — Они нейтрализуются в результате рекомбинации с поступившими от этого полюса электронами. Таким образом, они создают небольшой ток $I_б$, протекающий от базы к эмиттеру (в электронном смысле, конечно).

Л. — А какова судьба большинства дырок, которые достигли коллектора?

Н. — Там происходит то же самое явление: дырки нейтрализуются электронами, поступающими из отрицательного полюса батареи $E_{к\text{-}э}$. И каждый раз, когда электрон проникает из батареи в коллектор, чтобы нейтрализовать дырку, другой электрон покидает один из атомов эмиттера и поглощается положительным полюсом этой батареи; само собой разумеется, что, покидая свой атом, данный электрон порождает в эмиттере новую дырку. Ток поддерживается движением дырок от эмиттера к коллектору и электронов в обратном направлении. Разве не так?



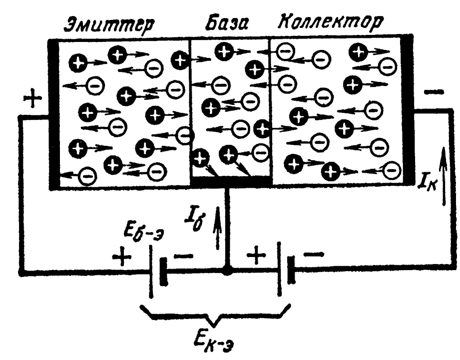
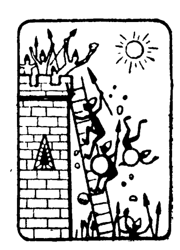


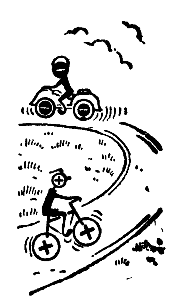
Рис. 29. Движение носителей зарядов в работающем *p-n-p* транзисторе. Для большей ясности ионы на этом рисунке не показаны.

Л. — Я восхищен, как здорово разобрался ты в работе транзистора. Действительно, все происходит так, как если бы армия штурмовала крепость. Атакующие достигают вершины стены и в неудержимом порыве врываются в город, прорываясь через ряды пытающихся их сдержать защитников.



Н. — Твоя аналогия, где крепостная стена представляет базу, а город — коллектор, была бы более убедительной, если бы осажденный гарнизон предпринимал контратаку, символизирующую движение электронов навстречу атакующим дыркам, вооруженным неотразимым... положительным зарядом. Да, кстати, с одинаковой ли скоростью движутся электроны и дырки?

НЕСКОЛЬКО ФУТУРИСТИЧЕСКИХ КОМБИНАЦИЙ

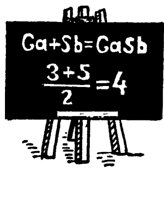


Л. — Нет, Незнайкин. В чистом германии под воздействием электрического поля величиной в один вольт на сантиметр электроны пробегают около сорока метров в секунду, тогда как дырки перемещаются вдвое медленнее. В кремнии при этих же условиях у электронов скорость порядка двенадцати метров в секунду, а скорость дырок составляет всего лишь два с половиной метра в секунду. А в некоторых интерметаллических соединениях скорость электронов достигает более полукилометра в секунду.

Н. — Что это за интерметаллические соединения, которые ты неожиданно суешь мне под нос?

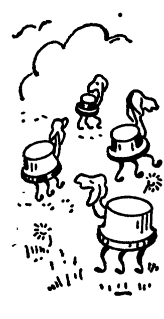
Л. — Это полупроводники, представляющие собой комбинацию трехвалентных и пятивалентных элементов...

Н. — ...комбинацию, дающую в среднем валентное число четыре, т. е. такое же, как у германия и кремния. Можешь ли ты назвать мне некоторые такие комбинации?



Л. — Пожалуйста. Из комбинации пятивалентной сурьмы и трехвалентного галлия, например, можно получить транзисторы. Трехвалентный индий в комбинации с пятивалентным фосфором даст полупроводниковый материал, используемый для производства некоторых диодов. Удалось даже использовать соединение кадмия (валентное число — два) с селеном (валентное число — шесть) для изготовления фотоэлементов. Область интерметаллических полупроводниковых материалов, являясь предметом активных исследований, открывает интересные перспективы будущего...

Н. — Дорогой друг, давай вернемся к нашим овцам... на трех ногах. Я хотел бы знать, чем различаются эмиттер и коллектор. В транзисторе *p-n-p* оба они типа *p* (так же как в транзисторе *n-p-n* они оба типа *n*). Не свидетельствует ли это об их взаимозаменяемости?



Л. — Нет, дорогой друг. И ты сам легко поймешь, почему. Если ток, идущий от эмиттера к базе, а затем к коллектору, имеет примерно одну и ту же величину, то этого нельзя сказать о напряжениях. Между базой и эмиттером напряжение невелико, а между коллектором и базой оно значительно выше.

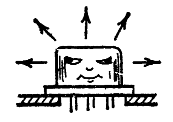
Н. — Я понял. Так как произведение тока на напряжение дает мощность, то мощность, рассеиваемая со стороны коллектора, во много раз больше той, которая рассеивается между эмиттером и базой.

Л. — Ты тысячу раз прав. Вот почему коллектор должен легче отводить выделяющееся там тепло. У него бо́льшая, чем у эмиттера, площадь. А в мощных транзисторах коллектор припаян к металлическому корпусу, что облегчает излучение тепла и передачу его на шасси благодаря теплопроводности корпуса.

О ВЫВОДАХ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЯХ

Н. — Теперь я понимаю, чем различаются электроды транзистора, но как их узнают? Как определить, какой вывод транзистора соединен с эмиттером, а какой соответствует базе или коллектору?

Л. — Опознаются они очень просто. Обычно три проволочных вывода расположены в линию (рис. 30), причем средний из них соединен с базой, один из крайних выводов, ближайший к среднему, — с эмиттером, а другой вывод — с коллектором (этот вывод иногда отмечается цветной точкой).



Н. — Это одновременно и просто и логично, как и условное изображение транзистора на твоих рисунках, которое представляет собой разделенный на три зоны-области прямоугольник.

Л. — Увы, Незнайкин, это действительно логичное и соответствующее истинной структуре транзистора условное изображение обычно не используется в схемах.

Н. — Досадно. Каково же «официальное» графическое обозначение транзистора?

Л. — Всемирно принятого условного обозначения нет. В разных странах и даже разные авторы в одной стране нередко применяют различные условные обозначения. Большин-

ство же пользуется обозначением в виде круга с жирной черточкой внутри, к середине которой подходят под углом две тонкие линии. Жирная черточка обозначает базу, тонкая линия, снабженная стрелкой,— эмиттер, а другая такая же линия, но без стрелки, — коллектор. А кроме того (запомни это как следует!), если стрелка направлена к базе (рис. 31), то это транзистор структуры *p-n-p*, а если от базы (рис. 32), то транзистор *n-p-n*.

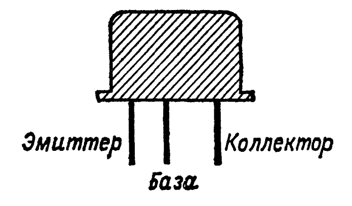
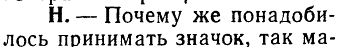
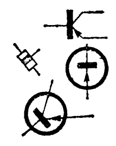


Рис. 30. Типичное расположение трех выводов транзистора.



Н. — Почему же понадобилось принимать значок, так мало соответствующий действительной структуре транзистора, где эмиттер и коллектор расположены по разные стороны от базы?



Л. — Это наследство доисторической эпохи, относящейся к 1948 г. Появившиеся тогда первые в мире транзисторы были «точечного» типа. Они состояли из кристалла германия типа *n*, служившего базой, на который опирались два металлических острия, расположенные очень близко одно к другому (рис. 33).

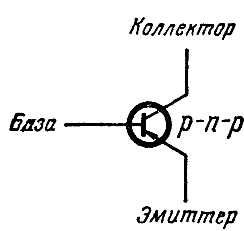


Рис. 31. Условное обозначение транзистора структуры *p-n-p*.

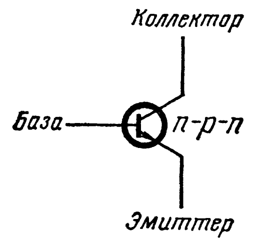


Рис. 32. Условное обозначение транзистора структуры *n-p-n*.

Н. — Любознайкин, а не было ли это возвращением к старому кристаллическому детектору?

Л. — Почти. Но вместо одного острия было два. Питание того транзистора осуществлялось так же, как питание современного транзистора структуры *p-n-p*. Точечный транзистор отличался тем же недостатком, что и его предок кристаллический детектор — отсутствием стабильности. Кроме того, он не мог работать при сколько-нибудь значительных мощностях. Вот почему теперь точечный транзистор совершенно не используется. В то же время точечный диод до сих пор используется широко, особенно на сверхвысоких частотах, например в радиолокации, потому что там высоко ценится малая емкость такого диода.

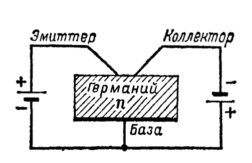
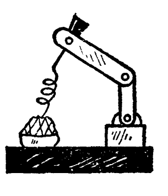
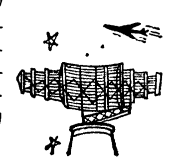


Рис. 33. Устройство точечного транзистора.





Н. — Прежде чем идти дальше, я хотел просить тебя, Любознайкин, кратко резюмировать (лучше в письменной форме) суть того, чему ты меня научил и что потребуется

для понимания твоих последующих объяснений. Это позволило бы мне до нашей следующей встречи лучше усвоить пройденное.

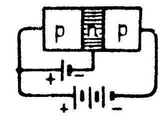
Л. — Я охотно составлю для тебя такое резюме и пришлю его по почте. А пока, Незнайкин, доброй ночи!

ПИСЬМО ЛЮБОЗНАЙКИНА К НЕЗНАЙКИНУ

Вот, мой дорогой друг, сведения, которые должны прочно врезаться в твою память:

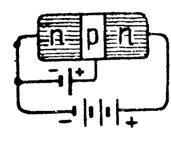
** Транзистор состоит из трех зон-областей: эмиттера, базы и коллектора. Они содержат примеси, придающие эмиттеру и коллектору электрические свойства, противоположные свойствам базы.*

** Существует два типа транзисторов: p-n-p и n-p-n. Больше распространен первый тип, по крайней мере среди транзисторов из германия. (По технологическим соображениям большая часть кремниевых транзисторов делается со структурой n-p-n.)*



** В транзисторе p-n-p базе сообщают отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал, а коллектору — еще более отрицательный, чем базе.*

** В транзисторе n-p-n база должна быть положительной по отношению к эмиттеру, а коллектор еще более положительным, чем база.*



** Отмечено, что в обоих случаях приложенные напряжения питают переход эмиттер — база в пропускающем направлении.*

** Ток базы имеет очень малую величину (микроамперы); ток коллектора значительно больше (миллиамперы).*

** Малое изменение тока базы вызывает сильное изменение тока коллектора. Отношение второго изменения к первому называется коэффициентом усиления по току.*

** Вход транзистора (база — эмиттер) имеет относительно небольшое сопротивление. Поэтому подаваемые на вход сигналы должны рассеивать некоторую мощность.*

** Выход транзистора (коллектор — эмиттер) отличается высоким сопротивлением.*

** Изменение напряжения, приложенного между базой и эмиттером, определяет изменение тока базы; а это изменение в свою очередь вызывает большее изменение тока коллектора. Если в цепь коллектора включен нагрузочный резистор, то на нем можно выделить усиленное напряжение.*

** Вот в нескольких словах, мой дорогой Незнайкин, выводы, к которым мы пришли.*

Твой друг Любознайкин

◎

БЕСЕДА ПЯТАЯ

НЕМНОГО ТЕХНОЛОГИИ

Конечно, Незнайкину не придется самому делать транзисторы, но это не мешает ему живо интересоваться довольно своеобразными приемами изготовления «трехлапых созданий». Попутно он узнает, что существует много разновидностей этих приборов, созданных для выполнения различных задач. Так, все возрастающие требования к частотным пределам и отдаваемой мощности заставили специалистов-технологов принять некоторые весьма оригинальные решения.

Содержание: Очистка методом зонной плавки. Высокочастотный нагрев. Выращивание монокристалла. Резка монокристалла. Метод изготовления «тянутых» переходов. Сплавные транзисторы. Проблема мощных транзисторов. Метод диффузии. Время пробега. Емкости *p-n* переходов. Полупроводниковый тетрод. Поверхностно-барьерные транзисторы. Метод двойной диффузии. Дрейфовый транзистор структуры *p-n-p*. Меза-транзистор. Полевой транзистор.

ПЕРВОНАЧАЛЬНАЯ ОЧИСТКА



Незнайкин. — Знаешь ли ты, Любознайкин, что у меня никогда не возникало искушение самому делать электронные лампы? Необходимость откачать из стеклянного баллона практически весь воздух была для меня непреодолимым препятствием, так как мой велосипедный насос не казался мне подходящим для этого. А теперь мне кажется, что я могу без особых затруднений изготовить для своих собственных нужд несколько транзисторов. Не думаешь ли ты, что я могу найти в магазине химреактивов все нужные мне вещества: чистый германий, сурьму для области *n* и индий для области *p*?

Любознайкин. — Ты это серьезно, мой бедный друг?

Н. — Конечно, а разве это так трудно?

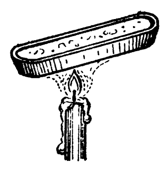
Л. — Еще как!.. Прежде всего нужно достаточно хорошо очистить германий, так как тот, что ты можешь найти в продаже под названием «чистый», далеко не так чист, как нам нужно. Затем ему нужно придать правильную кристаллическую структуру, превратив его в единый кристалл или *монокристалл*. Потом в него нужно ввести примеси типов *p* и *n*, создав оба перехода, разделяющие транзистор на три области — зоны. И, наконец, нужно припаять к этим областям выводы, смонтировать все это в единое целое и поместить в герметический корпус, чтобы защитить от внешних воздействий. Только большие, хорошо оснащенные заводы могут правильно выполнить эти разнообразные операции.



Н. — Ты приводишь меня в отчаяние. Неужели действительно так трудно очистить германий?

Л. — Не забывай, что нам нужен действительно чистый германий, в котором на миллиард атомов германия должно содержаться не более десяти атомов примесей, а то и еще меньше.

Н. — Я предполагаю, что для удаления из германия загрязняющих его посторонних веществ применяют химические процессы.



Л. — Химия делает все, что в ее силах, но этого недостаточно. Поэтому после химической очистки прибегают к физическому процессу, называемому з о н н о й п л а в к о й. Слиток очищаемого германия кладут в очень чистый тигель из кварца или графита и в атмосфере водорода или азота (чтобы избежать какого бы то ни было окисления), нагревают узкую зону этого слитка, доводя германий в этом месте до плавления. Эту расправленную зону медленно перемещают от одного конца тигля к другому.

Н. — Я думаю, что при этом примеси выгорают.

Л. — Ошибаешься. Процесс основан на том явлении, что примеси, стремясь остаться в жидкой зоне, уходят из тех частей германиевого слитка, которые, охлаждаясь, начинают затвердевать. Таким способом их постепенно сгоняют от одного конца бруска германия к другому и после повторения этой процедуры несколько раз обрезают конец стержня, в котором собраны все примеси.

Н. — И его выбрасывают?

Л. — Нет, потому что германий стоит очень дорого. Его повторно используют при очистке следующей порции германия.

Н. — Это заставляет меня думать, что наша Гóра вчера испытала на себе зонную очистку...

Л. — Кто такая Гóра, и что за чепуху ты мне рассказываешь?

Н. — Гóра — наша кошка (мы ее так зовем, потому что она наполовину ангорская). Обычно очень чистая, она, должно быть, связалась с дурной компанией, и нахватала блох. Проведя гребнем много раз от головы до хвоста, мы ее освободили от ее примесей... Но как устроен гребень для германия? Я хочу сказать, каким образом удается расплавить узкую зону германия?

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ НАГРЕВ

Л. — Делается это с помощью индукционного высокочастотного нагрева. Короткая катушка из нескольких витков охватывает зону плавления, по катушке пропускается от мощного генератора ток высокой частоты. Магнитное поле этой катушки наводит в массе германия токи, которые нагревают находящийся внутри катушки участок слитка до плавления (рис. 34).

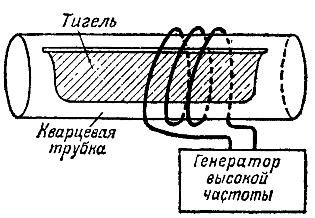


Рис. 34. Зонная плавка осуществляется нагреванием находящегося в тигле германия с помощью токов высокой частоты, протекающих по катушке, которая медленно перемещается от одного конца тигля к другому. Тигель помещен в кварцевую трубку, заполненную азотом или водородом.



Н. — Это же самое делали моему дяде Жюлю!

Л. — Что сделали твоему дяде? Что, у него тоже были блохи?

Н. — Нет, из-за злополучного падения его коленный сустав заполнился синовиальной жидкостью, и ему делали высокочастотную диатермию.

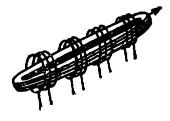
Л. — Я понимаю. Колено помещают между двумя хорошо изолированными электродами, к которым подводят напряжение высокой частоты. Созданное таким образом электрическое

поле благодаря потерям в диэлектрике нагревает сам больной орган. Но в отличие от этого при индукционном нагреве, используемом в зонной очистке, нагрев создается магнитным полем, которое наводит токи в массе полупроводника. Чудесная особенность высокочастотного нагрева заключается в том, что как при действии электрического поля на изолятор, так и при действии магнитного поля на проводник нагрев внутренних частей происходит не из-за постепенного проникновения тепла от периферийных частей в глубину (как это рекомендуется при приготовлении хорошего бифштекса), а одновременно на всю глубину.



Н. — Но вернемся к нашему германию. Катушка медленно двигается от одного конца тигля к другому...

Л. — ...если только не сам тигель медленно движется внутри катушки, что дает такой же результат. В действительности устанавливается несколько катушек на определенном расстоянии одна от другой с тем, чтобы за один проход тигля получить несколько зон плавления, чередующихся с зонами затвердевания. Результат получается такой же, как если бы вдоль слитка германия несколько раз прогнали одну зону плавления. Я хочу подчеркнуть, что германий движется очень медленно: один миллиметр в минуту.

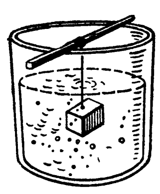


Н. — А что делают с кремнием?

Л. — То же самое, только при более высокой температуре: если германий плавится при 940° С, то для плавления кремния нужно 1420° С.

ПОСЛЕ ОЧИСТКИ — КРИСТАЛЛИЗАЦИЯ

Н. — А почему таким образом очищенный полупроводниковый материал нельзя непосредственно использовать для изготовления транзисторов? Разве он не кристаллический?



Л. — Он кристаллический, но это еще не такие кристаллы, какие нужны нам. После зонной очистки слиток состоит из большого числа сращенных в беспорядке кристаллов. Нам же нужна исключительно правильная, единая для всего куска германия кристаллическая решетка, ориентацию которой мы должны знать. Такую единую решетку, образующую монокристалл, получают путем выращивания кристалла вокруг маленького кристаллика, именуемого «затравкой».

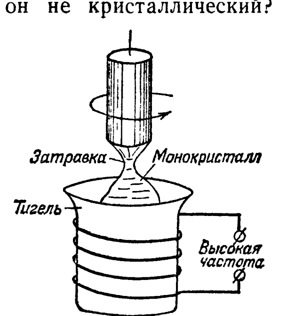


Рис. 35. Вытягивание монокристалла. Находящийся в тигле полупроводниковый материал поддерживается в расплавленном состоянии с помощью высокочастотного нагрева.

Н. — В свое время я забавлялся, выращивая красивые кристаллы: для этого в стакан с крепким раствором поваренной соли я опускал нитку с приклеенным крохотным кристалликом соли. За неделю вокруг этого кристаллика образовывался чудесный прозрачный куб. Не таким ли способом выращивают кристаллы полупроводника?

Л. — Принцип тот же, но вместо раствора используют очищенный германий в расплавленном состоянии. В него

опускают затравку, укрепленную на нижней части стержня, который вращается вокруг своей оси и одновременно очень медленно поднимается (рис. 35). Вокруг затравки атомы германия (или кремния) выстраиваются в правильную кристаллическую решетку. Полупроводниковый материал затвердевает, обволакивая затравку. В результате этого процесса через несколько часов получают монокристаллический стержень диаметром в несколько сантиметров, длиной до 30 *см*, весом в 1 *кг* и больше. Из него можно сделать тысячи транзисторов.

Н. — Одним словом, этот монокристалл представляет собой полупроводник высокой чистоты.

Л. — Нет, я забыл сказать тебе, что в расплавленную массу, из которой вытягивают монокристаллы, добавляют примесь типа *p* или типа *n*, так как для изготовления транзистора обычно требуется материал, содержащий определенную примесь в нужном количестве. Тогда одна из областей будущего транзистора, например база, уже будет готова.

А ТЕПЕРЬ НЕМНОГО МЕХАНИКИ

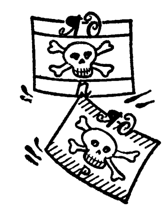
Н. — Ты сказал мне, что из одного монокристалла делают тысячи транзисторов; значит ли это, что его дробят на мелкие кусочки?



Л. — Разумеется. Для начала монокристалл режут, как обычную колбасу, на ломтики или пластинки толщиной от 0,1 до 2 *мм*. Такая тонкая операция производится алмазной дисковой пилой. Можно применять также ленточную пилу, состоящую из вольфрамовых нитей с абразивным покрытием. Затем каждая пластинка в свою очередь разрезается на маленькие квадратики со стороной в несколько миллиметров. Один такой квадратик с размерами 2·2 *мм* при толщине 0,5 *мм* весит всего лишь 0,01 *г*. Ты можешь подсчитать, что теоретически одного монокристалла в 5 *кг* достаточно на полмиллиона транзисторов! В действительности же при обработке немалая часть монокристалла превращается в отходы, что снижает выход готовых транзисторов.

МЕТОД ЧЕРЕДУЮЩИХСЯ ЯДОВ

Н. — Все же их получится внушительное количество, даже если предположить, что половина материала идет в отходы. Однако как эти чешуйки германия превращают в готовые транзисторы?



Л. — «Отравляя» такую чешуйку с обеих сторон примесью другого типа по сравнению с содержащейся в самой чешуйке. Например, если чешуйка вырезана из монокристалла с примесью типа *n*, то с обеих сторон в чешуйку вводят примесь типа *p* с тем, чтобы образовать эмиттер и коллектор транзистора типа *p-n-p*.

Н. — Уважаемый Любознайкин, у меня есть блестящая идея: почему бы не выпускать «полностью испеченные» транзисторы, вводя обе примеси сразу же при вытягивании кристалла. Например, в начале вытягивания в расплавленную массу полупроводника можно было бы бросить примесь типа *p*, хотя бы индий. Затем после образования зоны *p* и выведения ее из расплава в последний можно было бы бросить примеси типа *n*, например мышьяк, чтобы получить зону с проводимостью типа *n*. Затем следовало бы до-

бавить индия, чтобы акцепторы стали основными носителями зарядов, что снова дало бы нам зону *p* и т. д. В конечном итоге мы получили бы стержень германия с чередующимися зонами типов *p* и *n*. Достаточно было бы разрезать его на пластинки с зоной типа *n* посередине, чтобы получить транзисторы типа *p-n-p*, и с зоной типа *p* посередине, если мы захотим получить транзисторы типа *n-p-n*. Согласись, Любознайкин, что иногда ко мне приходят гениальные идеи!

Л. — Чем я любуюсь в тебе, так это твоей скромностью... К сожалению, в твоей идее нет ничего нового. Она давно известна и лежит в основе изготовления так называемых выращенных или «тянутых» переходов. Метод этот неэкономичен, так как полученные с его помощью зоны обладают довольно большой толщиной. Кроме того, прибавляя каждый раз примесь то одного типа, то другого, непрерывно повышают содержание примесей в поочередно образуемых зонах, что также не лишено недостатков. Тем не менее метод выращивания переходов применяется еще и в наши дни, особенно при изготовлении транзисторов из кремния.

СПЛАВНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Н. — Я еще раз убеждаюсь, что родился слишком поздно... Но вернемся к нашим чешуйкам — объясни мне, как на них формируют эмиттер и коллектор.

Л. — Для этого в зависимости от желаемой структуры транзистора применяют различные методы. Чаще всего процесс сводится к «отравлению» базы, т. е. введению в нее примесей другого типа, чем содержащиеся в материале базы. Наиболее простой и наиболее часто используемый метод заключается в накладывании на обе стороны пластинки германия типа *n*, служащей базой, маленьких кусочков («навесок») индия и быстром нагревании примерно до 600° С. При этой температуре индий сплавляется с находящимся под ним слоем германия, несмотря на то, что сам германий плавится только при 940° С. При остывании насыщенные индием области сплавления рекристаллизуются и приобретают проводимость типа *p*. Так получают транзистор структуры *p-n-p* (рис. 36).

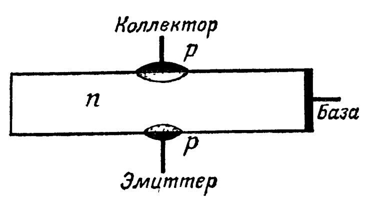
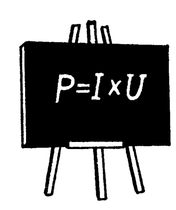


Рис. 36. Схематический разрез сплавного транзистора структуры *p-n-p*.

Как мы уже говорили раньше, пластинка, образующая коллектор, больше пластинки эмиттера. Это облегчает тепловой режим транзистора (на коллекторе рассеивается бо́льшая мощность) и улучшает его усилительные свойства. Операцию сплавления проводят при тщательно подобранных температуре и времени нагрева, добиваясь того, чтобы остающаяся между расплавленными областями часть чешуйки, образующая базу, составляла менее одной двадцатой доли миллиметра. Транзисторы, изготовленные таким способом, называются сплавными; они пригодны для самых различных применений в области низких и умеренно высоких частот (на длинных и средних волнах).

Н. — Ты опять говоришь мне о двух трудностях, с которыми мы сталкиваемся при применении транзисторов: о повышенных значениях мощности и частоты. Я хотел бы получить некоторые разъяснения по этому вопросу.

МЕТОД ПАРА И ДИФФУЗИИ



Л. — Так начнем с вопроса о мощности. Кто говорит ватты — говорит калории. Для получения достаточной мощности при небольшом напряжении, типичном для транзисторов, необходимо прибегать к большим токам.

Н. — Разумеется, потому что мощность равна напряжению, умноженному на ток.

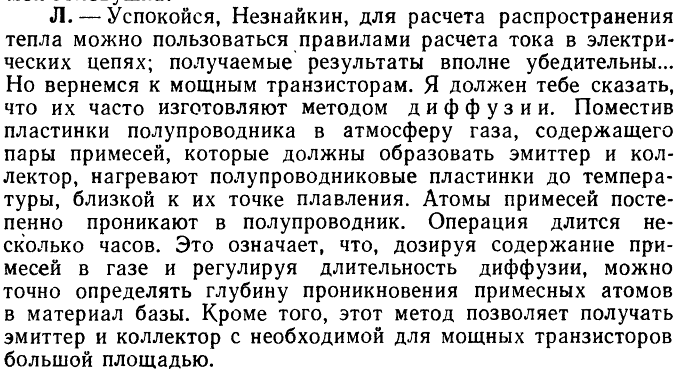
Л. — Браво! Но эти токи, проходя через переходы, имеющие малое сечение, выделяют на них тепло, а ты знаешь, как плохо полупроводники выдерживают температуру.

Н. — И какое же средство против этого ты предлагаешь?

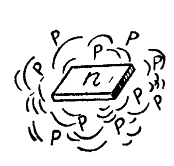
Л. — Прежде всего нужно увеличить сечение полупроводника, следовательно, делать транзисторы с относительно большой площадью. Затем следует облегчить отвод тепла, укрепив для этого коллектор на большой металлической пластинке, служащей радиатором. Медь является прекрасным проводником тепла, ее и рекомендуется использовать для этой цели.

Н. — Значит, рациональное использование транзисторов требует применения законов теплотехники. Если я правильно понял, мне следует заняться изучением и этой науки, бедная моя головушка!





Л. — Успокойся, Незнайкин, для расчета распространения тепла можно пользоваться правилами расчета тока в электрических цепях; получаемые результаты вполне убедительны... Но вернемся к мощным транзисторам. Я должен тебе сказать, что их часто изготовляют методом *диффузии*. Поместив пластинки полупроводника в атмосферу газа, содержащего пары примесей, которые должны образовать эмиттер и коллектор, нагревают полупроводниковые пластинки до температуры, близкой к их точке плавления. Атомы примесей постепенно проникают в полупроводник. Операция длится несколько часов. Это означает, что, дозируя содержание примесей в газе и регулируя длительность диффузии, можно точно определять глубину проникновения примесных атомов в материал базы. Кроме того, этот метод позволяет получать эмиттер и коллектор с необходимой для мощных транзисторов большой площадью.



Н. — Тем лучше, но что же тогда препятствует работе транзисторов на высоких частотах?

ДВА ПРЕПЯТСТВИЯ

Л. — Два фактора: время пробега и емкость.

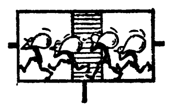
Н. — О каком пробеге ты говоришь?

Л. — О проходе носителей заряда через базу от эмиттера к коллектору. Этим временем пренебрегать нельзя, потому что, как я тебе уже говорил, электроны и дырки перемещаются с довольно ограниченными скоростями. Возьмем, например, электроны, пробегающие за секунду 40 *м*. Допустим, что нам удалось сделать базу толщиной в 0,1 *мм*. Значит, для пробега этого пути электрону потребуется 2,5 *мксек*.

Н. — Ну, это не так много.

Л. — И тем не менее для сигнала частотой в 1 *Мгц* это слишком много, так как период такого колебания имеет длительность всего лишь 1 *мксек*, и нашему электрону-увальню за время его неторопливого путешествия через базу придется дважды менять темп. Вот мы и столкнулись с тем, что транзистор не способен усиливать токи, частота которых превышает несколько сотен килогерц [1].

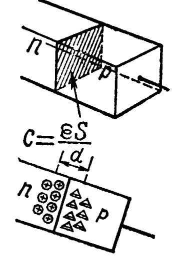
Н. — Какая трагическая ситуация! И я вижу один только выход: уменьшить толщину базы. Это возможно?



Л. — Да, и я расскажу тебе о средствах достижения этой цели. Но надо также учитывать второй опасный фактор: емкости *p-n* переходов.

Н. — А чем эти емкости нам мешают?

Л. — Разве ты забыл о том вреде, который причиняют паразитные емкости в ламповых схемах? Здесь они вызывают те же трудности. Емкостное сопротивление, которое они оказывают прохождению тока, тем меньше, чем выше частота токов. В результате токи высокой частоты, вместо того чтобы идти по предназначенной им дороге, удирают через паразитные емкости.



Н. — Действительно, эти емкости подобны ячейкам в решете, которое способно удержать только крупные орехи, а если попытаться наполнить его горохом; то он весь высыплется... Следовательно, чтобы наш транзистор работал на высоких частотах, нужно уменьшить площади эмиттера и коллектора. Ведь это должно уменьшить их емкости.

ТЕТРОД, КОТОРЫЙ ИМ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ

Л. — Правильно. Попутно заметь, что есть окольный способ снизить эффективную емкость, не уменьшая при этом чрезмерно площади переходов, что сильно бы ограничило рас-

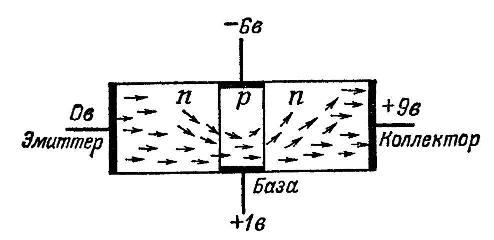
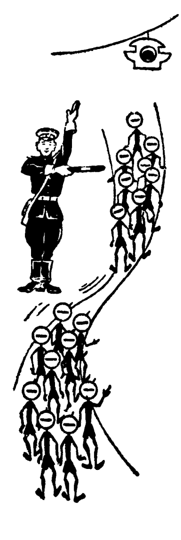


Рис. 37. Принцип действия полупроводникового тетрода. Контакт с потенциалом —6 *в*, помещенный напротив вывода базы, отталкивает электроны, сокращая эффективное сечение базы.

сеиваемую мощность. Это осуществлено в **полупроводниковом тетроде**. Я спешу сказать тебе, что работа этого прибора не имеет никакой аналогии с работой вакуумного тетрода... Здесь четвертый электрод размещается на базе

---

[1] Строго говоря, частотный предел работы транзистора определяется не временем пробега носителей через базу (это привело бы лишь к задержке усиливаемого сигнала), а различием времени пробега для отдельных носителей, в результате чего происходит «размывание» усиливаемого сигнала. Однако разброс времени пробега прямо пропорционален идущему в расчет среднему значению времени пробега, так что в конечном счете это время ограничиваег частотный предел транзистора. *Прим. ред.*



с противоположной от основного вывода стороны и его потенциал имеет противоположный знак (рис. 37). В этих условиях только часть эмиттерного перехода, прилегающего к основному выводу базы, получает прямое смещение, обеспечивающее впрыскивание носителей зарядов. Соответственно поток этих носителей прижимается к одной стороне базы, и таким образом удается значительно снизить эффективное сечение транзистора, что приводит к уменьшению роли емкости *p-n* переходов [1].

УМЕНЬШЕНИЕ ТОЛЩИНЫ БАЗЫ

Н. — Совсем неглупо придумали — придушить поток электронов или дырок! Но каким образом удается уменьшать толщину базы?

Л. — Это достигается путем вырезания с каждой стороны базы своего рода воронок или лунок. Донышки обеих лунок разделяет в этом случае расстояние всего лишь в несколько микрон. Затем в них осаждают немного индия — вот и весь фокус.

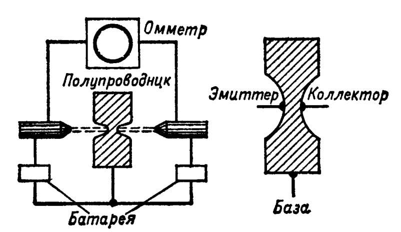
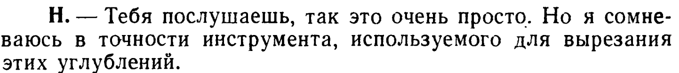


Рис. 38. Процесс изготовления поверхностно-барьерного транзистора и разрез такого транзистора.

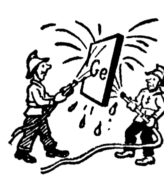


Н. — Тебя послушаешь, так это очень просто. Но я сомневаюсь в точности инструмента, используемого для вырезания этих углублений.



Л. — Этим инструментом служат очень тонкие струйки жидкости, по которым через германий проходит постоянный ток. В результате электролиза, а именно на этом явлении и основан процесс обработки, атом за атомом отрываются от полупроводника. В конце операции изменяют направление тока, и благодаря тому же электролизу атомы индия из соответствующего электролита осаждаются на поверхность только что вырезанных углублений (рис. 38).

Н. — Чудесно! Но как точно узнают тот момент, когда база стала достаточно тонкой?



Л. — Измеряя электрическое сопротиление между двумя струйками жидкости. Изготовленные этим способом транзисторы (их называют поверхностно-барьерными) могут использоваться на частотах, достигающих 100 *Мгц*.

Н. — Во всяком случае, они должны хорошо работать в диапазоне коротких волн.

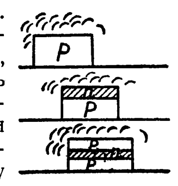
Л. — Другой способ уменьшения толщины базы заключается в применении двойной диффузии. Чтобы сде-

---

[1] Емкость коллекторного перехода у тетрода остается такой же, как у триода с аналогичной геометрией Уменьшение роли этой емкости на высоких частотах обусловлено снижением сопротивления области базы из-за того, что активная часть базы размещается в непосредственной близости от основного вывода базы *Прим. ред.*

лать транзистор структуры *p-n-p*, берут пластинку полупроводникового материала типа *p*...

Н. — Ты ошибаешься, Любознайкин.



Л. — Совсем нет. Сейчас ты увидишь, как все происходит. Пластинку подвергают действию паров только с одной стороны. Пары одновременно содержат примеси обоих типов, причем одна из примесей (обычно донорная) имеет скорость проникновения несколько большую, чем другая (акцепторная), но концентрация последней выше. В результате впереди слоя типа *p* образуется тонкий слой типа *n* и мы имеем транзистор структуры *p-n-p*, у которого база может иметь толщину всего лишь в одну тысячную долю миллиметра (1 *мкм*) и который способен усиливать на частотах до 400 *Мгц*.

Н. — Действительно, остроумное решение.

Л. — Не менее остроумен метод изготовления дрейфовых транзисторов, у которых прилегающий к эмиттеру слой базы содержит большее количество примесей (в случае структуры *p-n-p* — доноров) с тем, чтобы увеличить проводимость. При этом проникающие в базу электроны получают значительное ускорение, что позволяет отодвинуть частотный предел транзисторов до 1000 *Мгц*.

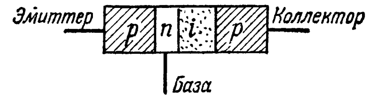
Н. — Все лучше и лучше! А развивая твою мысль, нельзя ли уменьшить емкость между коллектором и базой, разведя эти электроды и не увеличивая при этом толщины базы?

ОТДАЛЕНИЕ БАЗЫ



Л. — А каким средством ты предполагаешь достичь этой цели?

Н. — Я хотел бы проложить между базой и коллектором слой нейтрального германия, который не имел бы проводимости ни типа *p*, ни типа *n*, но увеличил бы расстояние между электродами.



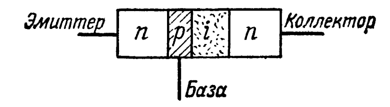


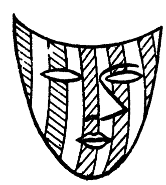
Рис. 39. Две возможные структуры транзистора с зоной собственной проводимости между базой и коллектором.

Л. — Это, мой друг, совсем неглупое предложение, и оно осуществлено в транзисторах под названием *p-n-i-p*, где буква *i* обозначает слой германия с собственной проводимостью (рис. 39).

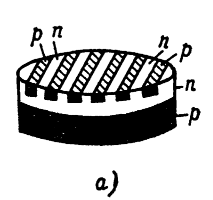
Н. — Черт возьми! Меня еще раз опередили!

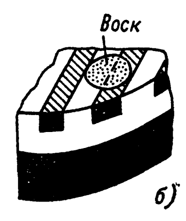
КОГДА ВСТАЕТ ВОПРОС О ГОРАХ

Л. — Весьма сожалею, Незнайкин... В заключение мне хотелось бы рассказать тебе еще об одной модели транзистора для высоких частот, в производстве которого используется метод двойной диффузии. Для изготовления такого



транзистора берут полупроводник типа *p*, который будет служить коллектором, и методом диффузии создают слой примесей типа *n*, который будет служить базой. Затем с той же стороны также с помощью диффузии вводят примеси типа *p*, которые, сокращая толщину базы до величины 0,002 *мм*, образуют эмиттер. Хитрость заключается в том, что последняя диффузия производится через маску, с тем чтобы подвергать воздействию только узкие полоски поверхности полупроводника. Эта поверхность после такой обработки (рис. 40, *а*)





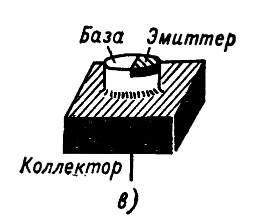
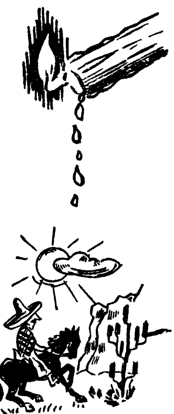


Рис. 40. Последовательные этапы изготовления меза-транзистора.



представляет чередующиеся полоски типа *p* (эмиттер) и типа *n* (база). Затем на эту поверхность наносят капельки воска так, чтобы каждая из них одновременно прикрывала и зону *n*, и зону *p* (рис. 40, *б*). Диаметр такой капельки не превышает четверти миллиметра. Пластинку полупроводника после этого опускают в раствор, стравливающий не защищенные воском участки. Произведенное таким образом травление уменьшает толщину всей пластинки и обнажает исходный материал типа *p* повсюду, кроме маленьких участков, которые были покрыты воском. После удаления воска пластинка оказывается покрытой крохотными бугорками (рис. 40, *в*), к каждому из которых можно припаять выводы базы и эмиттера (они делаются из золотой проволоки диаметром 0,025 *мм*).

Н. — Как можно работать с такой тонкой проволокой?

Л. — Под бинокулярным микроскопом, но, конечно, предварительно пластинка полупроводника травится и разрезается на кусочки по числу бугорков, из которых каждый превращается затем в транзистор. Эти транзисторы называют «меза», название, которое в Южной Америке служит для обозначения горных плато с обрывистыми краями.

Меза-транзисторы свободно преодолевают границу 100 *Мгц*, т. е. работают на волнах короче 3 *м*.

Н. — Какой тщательности и какого внимания требует изготовление этих микроскопических гор!

ПОСЛЕДНИЕ СТАДИИ ПРОИЗВОДСТВА

Л. — Не думай, Незнайкин, что работа завершена, когда путем сплавления, электролиза или диффузии создали эмиттер, базу и коллектор. Заметь попутно, что в этих трех методах соответственно используют твердые, жидкие и газообразные вещества.

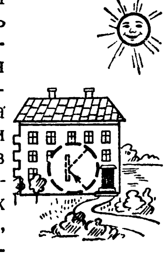
Н. — А что же еще остается сделать, чтобы транзистор окончательно был готов испытать все превратности судьбы?

Л. — Обработать его поверхность в кислоте и создать условия для изумительной продолжительности жизни, смонтировав его с достаточной жесткостью, обеспечивающей высокую

устойчивость против ударов и вибрации. И, наконец, закрыть его в герметичный и непрозрачный корпус, чтобы защитить от влажности и света — смертельных врагов полупроводников.

Н. — Почему?

Л. — Потому что, как я тебе уже говорил, световые лучи могут изменить проводимость полупроводников и вызвать электронную эмиссию. Эти явления используются в фотодиодах и фототранзисторах. Но обычный транзистор должен быть защищен от света. Поэтому он помещается в пластмассовую капсулу или металлический корпус. Корпус транзистора часто заполняют нейтральным газом (например, азотом) или особыми желеобразными веществами. Присоединение выводов нередко порождает острые проблемы, так как нужно создать чисто омические контакты между каждой из трех областей транзистора и соответствующими проволочками, любой ценой предотвращая образование паразитных *p-n* переходов.



Н. — Теперь, когда мы подводим итоги, я вижу, что для изготовления транзисторов нужно одновременно знать физику, химию и механику. Это слишком много. Я предпочел бы покупать транзисторы, если только...

Л. — Какую еще нелепую мысль ты собираешься мне изложить?

ПОЛЕВОЙ ТРАНЗИСТОР



Н. — Мне думается, что можно изготовлять транзисторы без базы, без эмиттера и без коллектора. Почему бы не взять простой стерженек германия или кремния, намотать посередине его кольцо, на которое и подавать усиливаемое напряжение? Создаваемое таким образом электрическое поле в большей или меньшей степени стало бы душить за горло поток

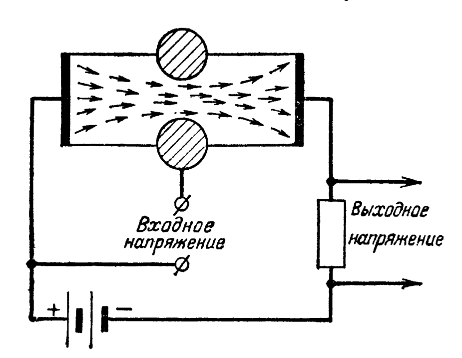


Рис. 41. Полевой транзистор.

носителей зарядов, проходящий от одного конца стерженька к другому, и ток в стерженьке модулировался бы точно так же, как это происходит в вакуумном триоде под воздействием потенциала сетки (рис. 41).

Л. — Бедный мой Незнайкин!..

Н. — Чего же не хватает в моих рассуждениях?

Л. — В них все так правильно, что прибор, который ты только что изобрел, уже давно существует. Он называется **полевым транзистором**. На него несколько похож

изобретенный во Франции т е к н е т р о н, который объединяет преимущества транзисторов и вакуумных ламп.

Н. — Наш полевой транзистор настолько похож на вакуумный триод, что у меня возникает желание назвать катодом ту сторону, через которую ток входит, анодом — сторону, через которую он выходит, а сеткой — расположенное посередине кольцо, на которое подается усиливаемое напряжение (рис. 42).

Л. — Ничто не мешает тебе применять эти названия, хотя обычно пользуются другими терминами: и с т о к вместо катода, с т о к вместо анода и з а т в о р вместо сетки. Роль сетки выполняет слой или две зоны полупроводника с проводимостью, обратной проводимости стерженька. Эти зоны, создаваемые методом сплавления или методом диффузии, располагаются по обе стороны средней части стерженька. Если стерженек сделан из полупроводника типа *n*, то затвор образуется двумя зонами из полупроводника типа *p*. Усиливаемое напряжение прилагается между затвором и истоком; затвор делается более или менее отрицательным относительно истока...

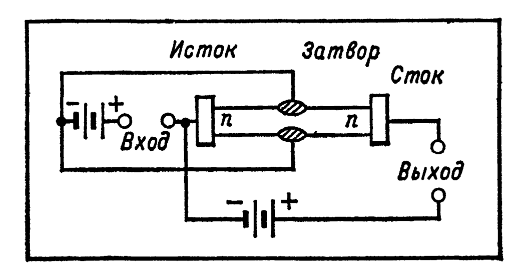


Рис. 42. Устройство полевого транзистора и схема его включения.

Н. — Точно так, как сетка относительно катода. В этом случае никакой ток не сможет протекать от затвора типа *p* к массе стерженька типа *n*, так как эти участки образуют диод, расположенный таким образом, что он не пропускает это напряжение. В этих условиях полное входное сопротивление нашего полевого транзистора в отличие от обычных транзисторов должно быть очень высоким.

Л. — Совершенно верно, дорогой Незнайкин. Ты видишь, насколько глубока аналогия с вакуумным триодом, хотя в зависимости от полярности приложенного напряжения ток может протекать в том или ином направлении. А отрицательные электрические поля, создаваемые затвором в массе стерженька в большей или меньшей степени сдавливают поток электронов, идущий от истока к стоку, соединенному с положительным полюсом источника высокого напряжения; это напряжение может достигать 60 *в*.

Н. — Иначе говоря, здесь мы имеем дело уже не с усилением по току, а с усилением по напряжению. И я думаю, что его можно охарактеризовать крутизной, замерив, на сколько миллиампер изменяется ток исток — сток при изменении напряжения затвор — исток на 1 *в*.

Л. — Ты, мой друг, прав. И я должен сказать, что некоторые полевые транзисторы имеют крутизну 10 *ма/в* и даже выше. Я с радостью отмечаю, что полевой эффект благотворно сказывается на тебе и стимулирует твои умственные способ-

ности... Чтобы полностью завершить эту тему, я добавлю, что существует особая разновидность этих транзисторов, сокращенно называемая МОП (от «Металл — Окисел — Полупроводник»). В этих приборах зоны, образующие затвор, покрыты тонким слоем изолятора (двуокиси кремния), на который нанесен слой металла. Усиливаемые сигналы подаются на этот слой, образующий одну обкладку конденсатора; второй обкладкой служат зоны затвора. В полевых МОП транзисторах входное сопротивление практически бесконечно.

Н. — Но этого я не могу сказать о моем сопротивлении усталости. Остановимся на этом, чтобы все новые понятия в моем бедном мозгу пришли в порядок.

БЕСЕДА ШЕСТАЯ

ЦАРСТВО КРИВЫХ

Для того чтобы применять транзисторы, надо знать их основные характеристики. Последние, как и характеристики ламп, могут выражаться значениями основных параметров или в виде графиков, показывающих, как некоторые токи и напряжения изменяются в зависимости от других. Однако для транзисторов графическое изображение характеристик особенно ценно, ибо каждая переменная величина влияет на большинство других.

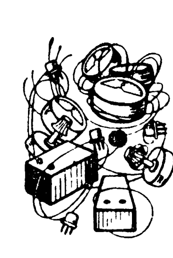
Вот почему двое наших друзей проделают очень полезную работу, рассмотрев различные параметры и характеристики транзисторов.

Содержание: Схема для снятия характеристик. Характеристики $I_б=f(U_б)$ и $I_к=f(U_б)$. Крутизна. Усиление по току. Входное сопротивление. Связь между крутизной, внутренним сопротивлением и усилением по току. Насыщение. Семейство характеристик. Аналогия с пентодом. Предельная мощность. Выходное сопротивление. Определение параметров по семейству статических характеристик.

ИНИЦИАТИВА НЕЗНАЙКИНА

Любознайкин. — Черт возьми! Что я вижу! Что означает это немыслимое скопище измерительных приборов, батарей и потенциометров на твоем столе?

Незнайкин. — Очевидно, ты не видишь главного, а на это есть причины. Ведь рядом с вольтметрами и амперметрами транзистор выглядит совсем маленьким. А он тем не менее виновник сегодняшнего торжества.



Л. — Но какова цель всего этого нагромождения приборов?

Н. — А ты помнишь, как некогда мы снимали характеристики электронных ламп: изменения анодного тока в зависимости от сеточного напряжения или от анодного напряжения? Ну вот, я и хотел снять аналогичные характеристики для своего транзистора.

Л. — Похвальная инициатива! И тебе удалось достичь цели?



Н. — И да, и нет... Как видишь, достаточно уклончивый ответ. Но меня смущает тот факт, что у лампы мы учитывали три величины: анодный ток $I_а$, напряжение анод — катод $U_а$ и напряжение сетка — катод $U_с$, а у транзистора нужно учитывать четыре: ток коллектора $I_к$, напряжение коллектор — эмиттер $U_к$, напряжение база — эмиттер $U_б$ и ток базы $I_б$.

Л. — Все это правильно. Действительно, кроме исключительных случаев, лампы работают без сеточного тока. В транзисторах же ток базы играет первостепенную роль.

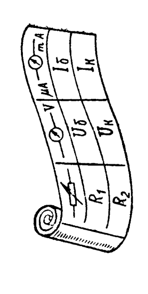


РАЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА

Н. — Вот схема, которую я придумал для снятия этих четырех величин (рис. 43).

Л. — Здесь я вижу потенциометр R_1, который служит для изменения по желанию напряжения между базой и эмиттером;

это напряжение измеряется вольтметром $U_б$. Кроме того, у тебя есть потенцимоетр R_2, служащий для изменения напряжения коллектор — эмиттер, измеряемого вольтметром $U_к$. Ты измеряешь ток базы микроамперметром $I_б$, а ток коллектора — миллиамперметром $I_к$. Поздравляю тебя, Незнайкин: с твоей схемой можно проделать хорошую работу! Что же у тебя не ладится?



Н. — У меня складывается впечатление, что я стал жертвой той самой шутки, которую я еще мальчишкой проделывал с нашей бравой кухаркой Меланьей.

Л. — Чем же отличалась эта жертва твоей ранней жестокости в области полупроводников?

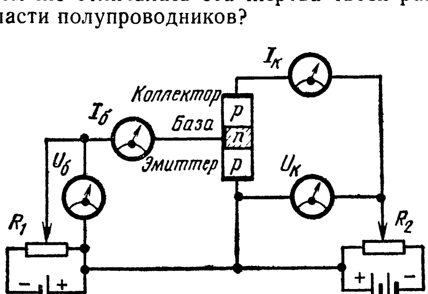


Рис. 43. Схема, используемая для снятия характеристик транзистора.

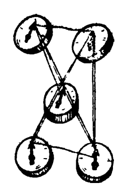


Н. — Однажды вечером я тонкой проволокой соединил все кастрюли между собой, и когда Меланья захотела взять одну из них, вся кухонная батарея обрушилась ей на голову.

Л. — Это, к сожалению, делает честь лишь твоему воображению. Но я все еще не вижу...

Н. — А тем не менее, это очевидно. У меня сложилось впечатление, что стрелки моих приборов связаны между собой невидимыми нитями, как кастрюли Меланьи. Достаточно одной из них покачнуться, как две другие немедленно приходят в движение. Например, когда я поворачиваю ручку потенциометра R_1, изменяя тем самым напряжение базы $U_б$, одновременно изменяется ток базы $I_б$, а также и ток коллектора $I_к$.

ДВЕ ПЕРВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

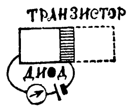


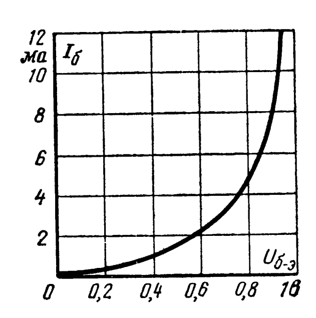
Л. — А разве это не нормально? Этим ты демонстрируешь сам принцип действия транзистора. Прилагая между базой и эмиттером возрастающее напряжение, ты повышаешь величину тока, идущего от эмиттера к базе, и тем самым увеличиваешь ток, идущий от эмиттера через базу к коллектору.

Н. — Разумеется. Это полностью аналогично влиянию сетки на анодный ток в вакуумной лампе. Кстати, вот две кривые, которые я снял, регулируя потенциометром R_1 напряжение $U_б$ и записывая для каждого его значения величины $I_б$ и $I_к$ (рис. 44 и 45).

Л. — Очень хорошо, Незнайкин. Я вижу, что ты испытываешь транзистор средней мощности, потому что коллекторный ток достигает здесь почтенной величины — порядка полуампера... Твоя первая кривая, где взаимодействуют только два элемента — эмиттер и база и которая характеризует зави-

симость тока базы от потенциала базы по отношению к эмиттеру, просто-напросто характеристика диода, образованного эмиттером и базой.





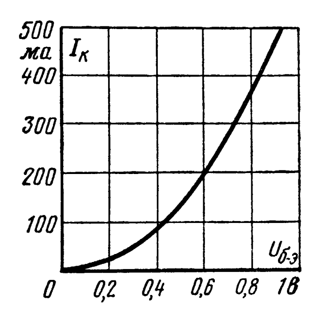


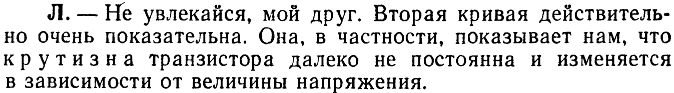
Рис. 44. Зависимость тока базы $I_б$ от напряжения база — эмиттер $U_б$. На этом рисунке, как и на всех остальных, где изображены характеристики транзисторов, полярность напряжений базы и коллектора не указана. Потенциалы обоих электродов положительны относительно эмиттера у транзисторов структуры *n-p-n* и отрицательны у транзисторов структуры *p-n-p*.

Рис. 45. Зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения база — эмиттер $U_б$.

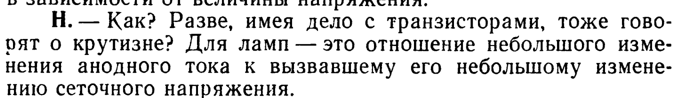


Н. — Правда! Ток увеличивается сначала медленно, а затем все быстрее и быстрее. Я вижу, что эта кривая не представляет большого интереса, но, думаю, что другая кривая, отражающая изменение коллекторного тока в зависимости от напряжения базы, имеет большее значение.

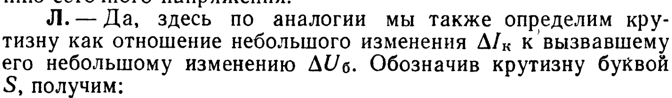
НЕЗНАЙКИН ЗНАКОМИТСЯ С ОБМАНЧИВОЙ КРУТИЗНОЙ



Л. — Не увлекайся, мой друг. Вторая кривая действительно очень показательна. Она, в частности, показывает нам, что к р у т и з н а транзистора далеко не постоянна и изменяется в зависимости от величины напряжения.



Н. — Как? Разве, имея дело с транзисторами, тоже говорят о крутизне? Для ламп — это отношение небольшого изменения анодного тока к вызвавшему его небольшому изменению сеточного напряжения.



Л. — Да, здесь по аналогии мы также определим крутизну как отношение небольшого изменения $\Delta I_к$ к вызвавшему его небольшому изменению $\Delta U_б$. Обозначив крутизну буквой S, получим:

$$S = \frac{\Delta I_к}{\Delta U_б}.$$

Крутизна у транзисторов, как и у ламп, выражается в миллиамперах на вольт.

Н. — Я действительно заметил, что при повышении напряжения базы крутизна нашего транзистора возрастает. При переходе от 0,2 к 0,4 *в* ток увеличился всего на 50 *ма*, а при

повышении напряжения базы от 0,6 до 0,8 *в* он увеличился примерно на 180 *ма*. Следовательно, в первом случае мы имеем крутизну 50 : (0,4 — 0,2) = 250 *ма/в*, а во втором случае 180 : (0,8 — 0,6) = 900 *ма/в*. Чудовищно! У лампы никогда нельзя получить такой крутизны.

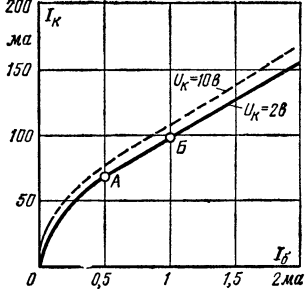
Л. — Однако не делай слишком поспешных выводов о том, что усиление транзистора действительно так велико. Здесь роль крутизны значительно скромнее, так как в конечном итоге решающее значение имеет влияние тока базы на ток коллектора.

ОПАСНО! ОГРАНИЧЕННАЯ МОЩНОСТЬ

Н. — Я обнаружил это, когда снимал зависимость тока коллектора $I_к$ от тока базы $I_б$ для двух значений напряжения $U_к$ на коллекторе: 2 и 10 *в* (рис. 46).

Л. — А почему часть кривой для этого последнего напряжения $U_к = 10$ *в* проведена пунктиром?

Н. — Потому что она нанесена условно. Я не осмелился допустить, чтобы коллекторный ток превысил 35 *ма*, так как предельная мощность транзистора составляет 350 *мвт* (в инструкции выпустившего его завода недвусмысленно сказано об этом). Ток в 35 *ма* при напряжении в 10 *в* дает как раз эту предельную мощность, а я не хотел превышать ее, чтобы не погубить плод своих сбережений.




Л. — Ты действовал мудро, и мне остается лишь тебя поздравить. Обрати внимание, что кривые, показывающие изменения $I_к$ под воздействием $I_б$, чаще всего приближаются к прямой линии. Впрочем, в этом мы уже имели возможность убедиться, рассматривая рис. 24.

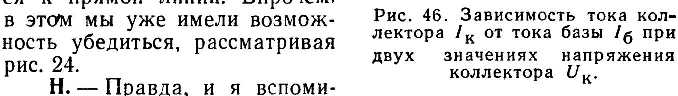


Рис. 46. Зависимость тока коллектора $I_к$ от тока базы $I_б$ при двух значениях напряжения коллектора $U_к$.

Н. — Правда, и я вспоминаю, что эти кривые позволяют определить коэффициент усиления по току β, который показывает, во сколько раз изменения тока коллектора больше изменений тока базы.

Л. — Можешь ли ты определить этот коэффициент по кривой $U_к = 2$ *в*?



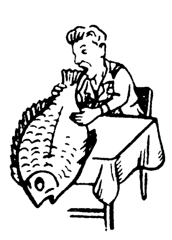
Н. — Это очень просто. Когда мы повышаем ток базы, например, с 0,5 до 1 *ма* (точки *А* и *Б*), ток коллектора увеличивается с 70 до 97,5 *ма*. Следовательно, изменению тока базы на 0,5 *ма* соответствует изменение тока коллектора на 27,5 *ма*. Значит, усиление по току β = 27,5 : 0,5 = 55 раз.

Л. — Браво! А в более общей форме можно сказать, что

$$\beta = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б},$$

где $\Delta I_к$ и $\Delta I_б$ представляют соответственно малые изменения тока коллектора и тока базы.

СОПРОТИВЛЕНИЕ, КОТОРОЕ НЕ ЯВЛЯЕТСЯ НА ПЕРЕКЛИЧКУ



Н. — Скажите, пожалуйста! Все эти малые изменения токов и напряжений напоминают мне что-то знакомое, как мотив песенки моего далекого детства. После крутизны и коэффициента усиления нам не хватает только внутреннего сопротивления... и мы вновь встретим ту же семью основных параметров, что и у ламп.

Л. — Осторожнее, мой друг! Еще раз говорю тебе: остерегайся поспешных аналогий. У ламп коэффициент усиления представляет собой отношение двух напряжений, у транзисторов — это отношение двух токов. Точно так же, говоря о внутреннем сопротивлении ламп, имеют в виду часто выходное сопротивление, тогда как у транзисторов, как мы уже видели, говорят о в х о д н о м с о п р о т и в л е н и и или сопротивлении эмиттер — база. И, как всякое сопротивление, оно представляет собой отношение напряжения к величине тока, как сказал бы покойный физик Ом.

Н. — Или, говоря так же строго, как ты, это — отношение малого изменения напряжения базы к вызываемому им малому изменению тока базы. А применяя для обозначения этих малых изменений милые твоему сердцу «дельты», я бы написал следующую формулу входного сопротивления:

$$R_{вх}=\frac{\Delta U_б}{\Delta I_б}.$$



Л. — Незнайкин, уж не проглотил ли ты целую гигантскую камбалу, фосфор которой заставляет твою голову так интенсивно работать? Уж коль скоро ты продемонстрировал свои способности, попробуй-ка рассчитать по одной из своих кривых величину входного спротивления твоего транзистора?

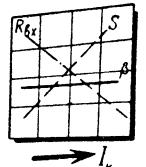
Н. — Нет ничего проще. Для этого нужно вернуться к кривой на рис. 44, показывающей, как изменяется $I_б$ в зависимости от $U_б$. Мы видим, что при переходе от 0,5 к 0,6 *в* ток изменяется примерно на 1 *ма*, а $R_{вх}$, как известно, можно рассчитать, разделив 0,1 на 1, что даст нам 0,1 *ом*.

Л. — Не стыдно ли тебе, Незнайкин, в твои годы путать миллиамперы с амперами?

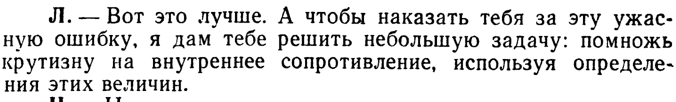
Н. — О, прости! Я должен был разделить 0,1 *в* на 0,001 *а*, что даст мне $R_{вх}$ = 100 *ом*.

ОЧЕНЬ ПОЛЕЗНОЕ СООТНОШЕНИЕ

Л. — Вот это лучше. А чтобы наказать тебя за эту ужасную ошибку, я дам тебе решить небольшую задачу: помножь крутизну на внутреннее сопротивление, используя определения этих величин.



Н. — Ну, это просто:



$$SR_{вх}=\frac{\Delta I_к}{\Delta U_б}\,\frac{\Delta U_б}{\Delta I_б}=\frac{\Delta I_к}{\Delta I_б}=\beta.$$

Раньше я сомневался, что когда-нибудь справлюсь с подобными задачами. Итак, у с и л е н и е п о т о к у р а в н о п р о и з в е д е н и ю к р у т и з н ы н а в х о д н о е с о п р о т и в л е н и е. Это напоминает мне соотношение, выведенное ранее для ламп: $\mu=SR_i$, где R_i, однако, обозначает внутреннее сопротивление.

Л. — Можешь ли ты проверить, соответствует ли это равенство параметрам, которые ты рассчитал для своего транзистора?

Н. — По кривой на рис. 45 в районе 0,5 *в* крутизна составляет 500 или 600 *ма/в*, или в среднем 0,55 *а/в*. Если умножить крутизну на входное сопротивление в той же точке (а там оно равно 100 *ом*), то получим 55, что как раз соответствует найденному нами усилению по току.

Л. — Все идет к лучшему в этом лучшем из миров! Заметь попутно, Незнайкин, что обычно коэффициент усиления почти не изменяется от увеличения тока коллектора. Что же касается крутизны, то, как мы видели, она возрастает при повышении тока $I_к$.

Н. — Отсюда я делаю вывод, что если наше равенство $SR_в = \beta$ остается в силе, то при увеличении тока коллектора входное сопротивление должно снижаться.

ВСЕ КРИВЫЕ НА ОДНОМ ГРАФИКЕ

Л. — Устами младенцев глаголет истина... А теперь надо тебе сказать, дорогой друг, что различными данными, распыленными по снятым тобой кривым, будет значительно легче пользоваться, если ты возьмешь на себя труд составить по результатам своих измерений график, показывающий, как изменяется ток коллектора при изменении напряжения на нем.

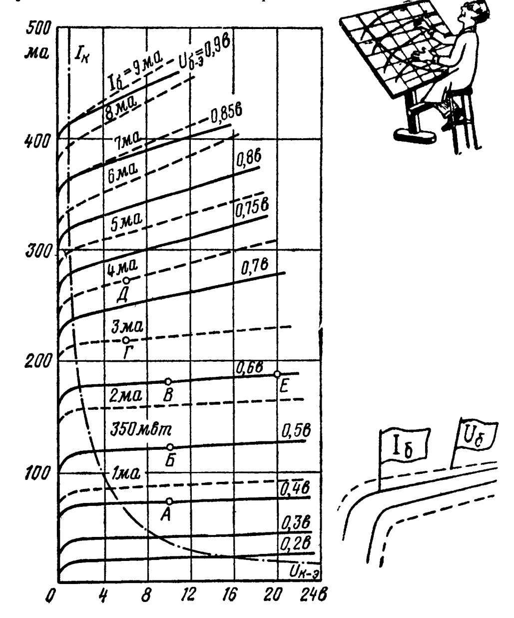


Рис. 47. Зависимость тока коллектора $I_К$ от напряжения коллектора $U_К$ при различных значениях базы $U_б$ и тока базы $I_б$ (для того же транзистора средней мощности, что и на рис. 44—46).

Н. — Если я правильно понял, речь идет о кривых, аналогичных кривым, характеризующим анодный ток в зависимости от анодного напряжения.

Л. — Совершенно верно.

Н. — А при каком напряжении на базе я должен снимать такие кривые?

Л. — Вычерти серию кривых для ряда значений $U_б$. Установи, например, для начала 0,2 *в*. Затем, начиная с нуля, повышай постепенно напряжение на коллекторе и записывай соответствующие значения тока $I_к$ (рис. 47).

Н. — Это очень любопытно. Начиная от нуля, ток достигает величины 20 *ма* при напряжении менее 2 *в* и затем совершенно перестает нарастать, даже если напряжение на коллекторе довести до 24 *в*. Чем это объяснить?

Л. — Ты столкнулся с явлением н а с ы щ е н и я. Когда все носители зарядов, вызванные к жизни приложенным между базой и эмиттером напряжением, участвуют в образовании

тока коллектора, ты можешь сколько угодно повышать напряжение коллектора...

Н. — ...самая красивая девушка в мире не может дать больше, чем она имеет.

Л. — Теперь, когда ты снял кривую при $U_б = 0{,}2$ *в*, можешь снять другие кривые, например при $U_б = 0{,}3$ *в*, и т. д. Впрочем, ты можешь устанавливать не то или иное значение напряжения базы, а ряд значений тока базы $I_б$. Кривые для такого случая показаны на рис. 47 пунктиром. Как видишь, мы можем получить два семейства кривых, показывающих зависимость тока коллектора от напряжения коллектора при различных значениях либо напряжения базы, либо тока базы. Говорят, что эти последние значения, которые устанавливаются для каждой из кривых, являются параметрами семейства характеристик.

СХОДСТВА И РАЗЛИЧИЯ

Н. — Эти почтенные семьи во многом похожи на те семейства, которые показывают, как у вакуумных ламп анодный ток изменяется в зависимости от анодного напряжения, когда в качестве параметра принято сеточное напряжение. Особенно поразительное сходство наблюдается с пентодами (рис. 48).

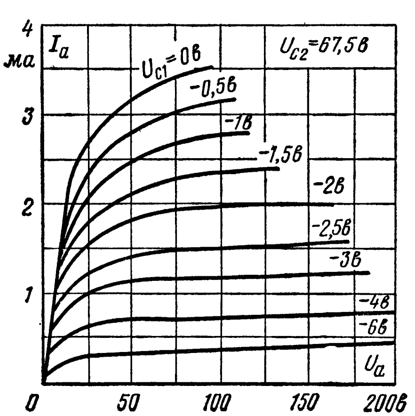
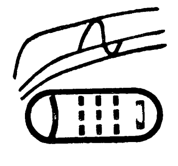


Рис. 48. Зависимость анодного тока $I_а$ пентода от анодного напряжения $U_а$ при различных значениях смещения на управляющей сетке U_{c_1}.



Л. — Правильно, но тем не менее следует отметить два серьезных различия: во-первых, характеристики пентода как бы выходят из одной точки и затем расходятся...

Н. — ...наподобие фейерверка.

Л. — Да, если такое сравнение тебе нравится. А у транзисторов кривые очень быстро поднимаются, а затем после изгиба идут почти горизонтально. Ты лучше убедишься в этом, рассматривая характеристики транзистора малой мощности (рис. 49). Во-вторых, кривые пентода расположены плотно одна к другой при больших отрицательных значениях сеточного напряжения, а затем расстояние между соседними кривыми увеличивается. А у транзистора при различных значе-

ниях тока базы расстояние между характеристиками (на рис. 49 проведены пунктиром) на всем протяжении примерно одинаковое. И в этом проявляется одно из преимуществ транзистора.

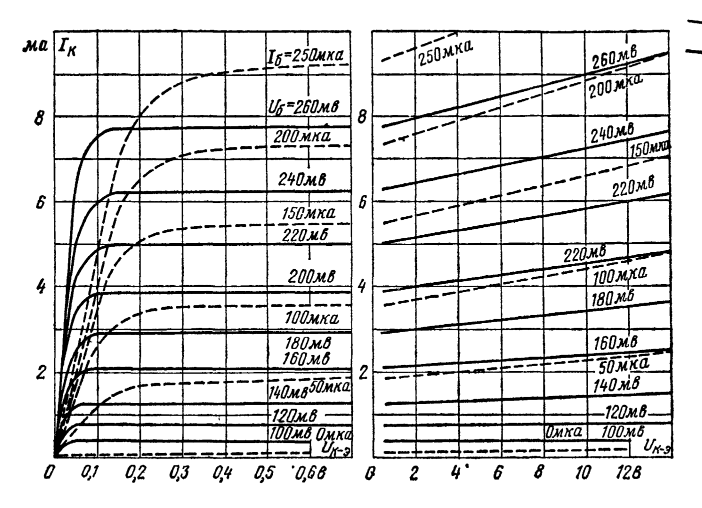


Рис. 49. Выходные характеристики транзистора малой мощности. На левом графике масштаб напряжений коллектора $U_к$ растянут, чтобы лучше показать, что происходит в области малых напряжений.

Н. — Почему?

Л. — А разве ты не видишь, что он будет с меньшими искажениями, чем пентод, усиливать сигналы с большой амплитудой? Одинаковое изменение тока базы в положительную и отрицательную стороны вызовет одинаковые изменения тока коллектора. У пентода же положительные и отрицательные полупериоды сеточного напряжения вызывают неодинаковые изменения анодного тока.

Н. — И это проявляется в тех ужасных искажениях, которые называются нелинейными. Следовательно, транзистор превосходит пентод лучшим показателем линейности. Да здравствует транзистор! [1]

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК

Л. — Я хотел бы вернуться к семейству характеристик, изображенному на рис. 47, чтобы ты лучше понял, какие полезные сведения содержатся в них с важнейших свойствах транзисторов. Пользуясь этими кривыми, ты можешь, например, определить крутизну для любого напряжения базы.

Н. — Действительно, если я, например, перехожу от напряжения базы 0,4 к 0,5 *в* (из точки *А* в точку *Б*), то ток

[1] Механизм нелинейных искажений в усилителях с транзисторами сложнее, чем здесь описывается. В частности, большую роль играет внутреннее сопротивление источника усиливаемого сигнала. Изучив этот вопрос глубже, Незнайкин, быть может, умерил бы свой восторг. *Прим. ред.*



повышается от 75 до 125 *ма*, т. е. на 50 *ма*. Следовательно, крутизна $S=50:0{,}1=500$ *ма/в*.

Л. — Так же легко ты можешь определить по нашему графику и усиление по току.

Н. — Я думаю, что для этого нужно перейти с одной кривой $I_б$ на другую. Возьмем, например, точки *Г* и *Д*, для которых разница тока базы составляет 1 *ма*; ток коллектора возрастает с 220 до 275 *ма*, т. е. на 55 *ма*. Следовательно, усиление по току $\beta=55:1=55$. Это достаточно просто... но что за странная кривая спускается слева направо, которую ты пометил надписью 350 *мвт* (рис. 47)?

Л. — Она показывает предельную мощность транзистора. Для каждой из точек этой линии произведение напряжения коллектора на величину его тока равно 350.

Н. — И правда, 10 *в* соответствует ток 35 *ма*, а напряжению в 5 *в* — ток 70 *ма*. Так, значит, это граница, которую не следует переходить?

ВОЗВРАЩЕНИЕ К «ДЕЛЬТАМ»

Л. — Да, эта кривая — гипербола, но нам еще представится случай к ней вернуться. А пока я хотел бы познакомить тебя еще с одной в высшей степени полезной характеристикой транзистора — с его *выходным сопротивлением*. Догадываешься ли ты, о чем идет речь?

Н. — Некоторое количество фосфора в моей голове еще осталось, и я попытаюсь. Я предполагаю, что речь идет о сопротивлении, которое определяет поведение тока коллектора, когда его заставляют изменяться, изменяя напряжение коллектора. Не так ли?



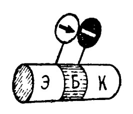
Л. — Очень хорошо. Незнайкин. Добавь к этому, что во время этих изменений потенциал базы остается постоянным. И продолжай свои рассуждения, думая о нашем святом Оме.

Н. — Я догадался! Выходное сопротивление представляет собой отношение напряжения коллектора к его току.

Л. — Это еще не исчерпывающее объяснение. В нем не хватает небольших значков — дельт...

Н. — При так любезно брошенной спасательной веревке я просто не могу ошибиться. Вот определение, которое способно заставить побледнеть от зависти моего старого преподавателя математики.

Выходным сопротивлением транзистора называется отношение небольшого изменения напряжения коллектора к вызываемому им изменению тока коллектора, что можно записать следующим образом:



$$R_{вых}=\frac{\Delta U_к}{\Delta I_к}$$

(что соответствует $\Delta U_a/\Delta I_a=R_i$ для электронных ламп).

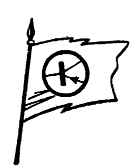
Л. — Твой торжествующий вид оправдан. Съеденная тобой гигантская рыбина продолжает оказывать благотворное влияние на твои умственные способности... Не мог бы ты, основываясь, как и раньше, на графике, изображенном на рис. 47, определить выходное сопротивление нашего транзистора, ну, скажем, при $U_б=0{,}6$ *в*.

Н. — Очень просто... Возьмем точки *В* и *Е*, соответствующие напряжениям 10 и 20 *в* на коллекторе, т. е. различающиеся между собой на 10 *в* ($\Delta U_к=10$ *в*). По графику мы видим, что на этих точках ток коллектора повышается со 180

примерно до 182 *ма*, т. е. $\Delta I_к=2$ *ма*, или 0,002 *а*. Следовательно, выходное сопротивление $R_{вых}=10:0{,}002=5\,000$ *ом*.

Л. — Прекрасно! Если бы ты рассчитал выходное сопротивление для больших значений тока, то обнаружил бы, что оно еще меньше. Но не забывай, что мы имеем дело с транзистором средней мощности. Если бы мы взяли маломощный транзистор с такими характеристиками, какие показаны, например, на рис. 49, то выходное сопротивление оказалось бы намного больше. Действительно, эти кривые почти горизонтальны, и даже большое увеличение $U_к$ вызывает лишь незначительный прирост тока $I_к$ и их частное выражается величиной в несколько миллионов ом.

Н. — Какое странное создание этот транзистор, у которого входное сопротивление низкое, а выходное — высокое. Можно подумать, что он нарочно сделал это, чтобы показать нос электронным лампам... А, я догадался! Входное сопротивление мало потому, что по переходу эмиттер — база ток проходит в прямом направлении, а через переход база — коллектор току приходится идти в обратном направлении, преодолевая переход с трудом, поэтому выходное сопротивление получается высоким.



Л. — Это совершенно законное рассуждение, но я опасаюсь, что твои сегодняшние запасы фосфора подходят к концу и твое входное сопротивление становится колоссальным.

◎

БЕСЕДА СЕДЬМАЯ

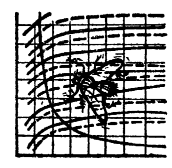
ПРЯМЫЕ И КРИВЫЕ

В предыдущей беседе Любознайкин и Незнайкин рассмотрели основные характеристики транзисторов. Последние могут выражаться численными значениями различных отношений — малосигнальных параметров или, что лучше, в виде семейств кривых, показывающих, как одни величины изменяются под воздействием других. Графический метод дает более полное представление о свойствах транзистора, чем малосигнальные параметры, которые справедливы только для строго определенных условий. Однако у транзисторов, как мы без сомнений можем сказать, все зависит от всего...

В этой беседе двое наших друзей сумеют извлечь из семейства характеристик ценные сведения о действительной работе транзистора в усилителе с определенным нагрузочным сопротивлением. Попутно они также изучат способы подачи смещения.

Содержание: Статические и динамические характеристики. Вычерчивание нагрузочной прямой. Рабочая точка. Усиление по току, напряжению и мощности. Максимальные значения переменной составляющей. Область насыщения. Выбор сопротивления нагрузки. Динамическая крутизна. Подача смещения.

ТРАНЗИСТОР В МИРЕ НЕ ОДИНОК



Незнайкин. — Со времени нашей последней встречи меня преследуют чудовищные кошмары. Мне снится, что я муха, попавшая в гигантскую паутину, состоящую из характеристик транзистора. Я отчаянно бьюсь, но не могу вырваться... Не правда ли, ужасно?

Любознайкин. — Я чрезвычайно огорчен, что таким образом нарушил твой ночной покой... Не лучше ли мне отныне отказаться говорить об этих несчастных кривых?

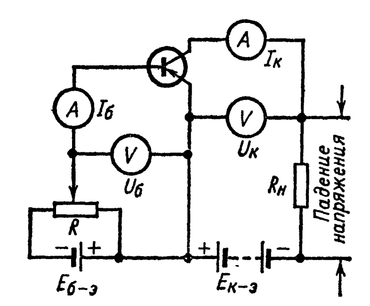


Рис. 50. Для снятия динамических характеристик транзистора достаточно дополнить схему, показанную на рис. 43, нагрузочным резистором $R_н$, включенным в цепь коллектора. Начиная с этого рисунка, транзистор на схемах будет изображаться общепринятым условным обозначением.

Н. — Напротив, я хотел бы, чтобы ты объяснил мне, как нужно ими пользоваться в различных условиях эксплуатации транзисторов.

Л. — Что ты подразумеваешь под этим?

Н. — Мы снимали эти характеристики, изменяя напряжение $U_к$, приложенное между коллектором и эмиттером. И мы делали это при различных значениях тока базы $I_б$ (или, что в принципе одно и то же, при различных значениях напряжения базы $U_б$). В действительности же наш транзистор не живет как отшельник-эгоист, изменяя свои напряжения и токи

лишь ради собственного удовольствия... Он должен подавать напряжения или токи на другой транзистор, установленный в следующем каскаде. Или же, если он стоит последним в цепочке усилителя, он должен «выдавать ватты» громкоговорителю. В любом случае транзистор должен иметь в цепи коллектора сопротивление нагрузки $R_н$ (рис. 50).

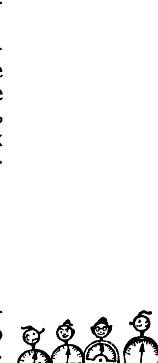
Л. — Совершенно верно, но что же тебе непонятно?

ЕЩЕ РАЗ О КУХОННОЙ БАТАРЕЕ

Н. — То, что теперь мои напряжения на коллекторе будут зависеть от величины тока коллектора. Ведь фактическое напряжение $U_к$ между коллектором и эмиттером меньше напряжения батареи $E_{к\text{-}э}$, так как из последнего нужно вычесть падение напряжения, вызываемое током $I_к$ на нагрузочном сопротивлении $R_н$. Следовательно, если, увеличив ток базы, вызвать приращения тока коллектора, то падение напряжения на сопротивлении $R_н$ возрастет и напряжение на коллекторе снизится.

Л. — Ты правильно рассудил, Незнайкин! И я понимаю, что тебя беспокоит: сеть наших кривых совершенно не учитывает этих явлений.

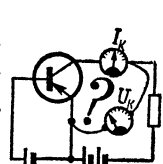
Н. — Я все больше и больше думаю о своей кухонной батарее, которую я некогда создал, связав между собой все кастрюли... Из-за наличия этого сопротивления нагрузки все наши напряжения и токи связаны. И достаточно повернуть ручку потенциометра R_1, чтобы стрелки всех наших четырех приборов двинулись в едином порыве, подобно солдатам, маневрирующим по команде офицера...



ОДНА ПРЯМАЯ СРЕДИ КРИВЫХ

Л. — Попытаемся навести в этом порядок. Возьмем транзистор малой мощности, скажем, на 75 *мвт*. Посмотри на его кривые (рис. 51), где проведена и прерывистая линия, обозначающая предельную мощность, которую не следует превышать. Предположим, что батарея $E_{к\text{-}э}$, питающая коллектор, имеет напряжение 9 *в*. Скажи, при каких условиях такое же напряжение мы обнаружим на коллекторе?

Н. — Если не происходит никакого падения напряжения на сопротивлении $R_н$, т. е. если ток $I_к$ равен нулю.



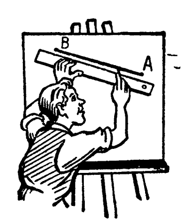
Л. — Ну вот, это условие мы и обозначим на нашем графике первой точкой *А*, где $U_к=9$ *в* и $I_к=0$. Теперь допустим, что сопротивление $R_н=275$ *ом*. Можешь ли ты рассчитать, при каком значении коллекторного тока на этом резисторе упадет все напряжение, так что на самом коллекторе не будет никакого напряжения?

Н. — Разумеется, применяя закон Ома, я могу найти величину тока $I_к$, который на резисторе $R_н=275$ *ом* создаст падение напряжения в 9 *в* и полностью погасит напряжение батареи $E_{к\text{-}э}$

$$I_к=\frac{E_{к-э}}{R_н}=\frac{9}{275}=0{,}0325\ а=32{,}5\ ма.$$

Л. — Прекрасно! Это позволяет нам поставить вторую точку *Б*, где $U_к=0$ и $I_к=32{,}5$ *ма*. Нам остается теперь только

взять линейку и соединить наши точки *А* и *Б* красивой прямой линией, которая будет называться **нагрузочной прямой** для сопротивления нагрузки в 275 *ом*.



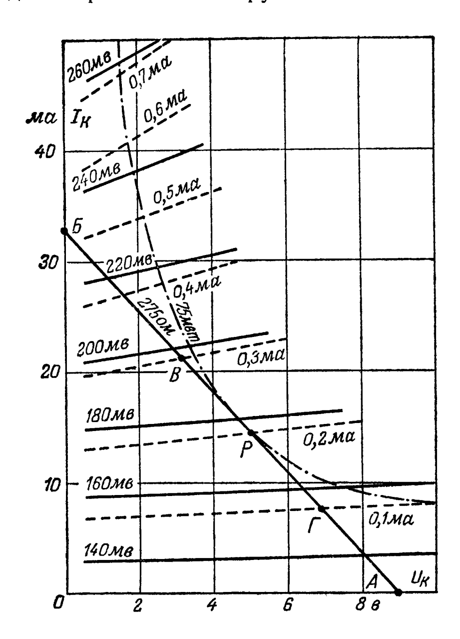


Рис. 51. Характеристики транзистора малой мощности и линия нагрузки.

Н. — Изрядно же мы продвинулись вперед! Я совершенно не вижу, что дает нам эта нагрузочная прямая. Начать хотя бы с того, например, как ток коллектора может достичь 32,5 *ма*, если в этот момент на коллекторе нет никакого напряжения.

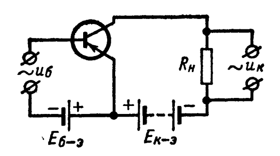
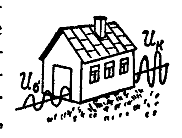


Рис. 52. Схема применения транзистора в качестве усилителя. Переменное напряжение $u_б$ приложено между базой и эмиттером. На выходе на нагрузочном резисторе $R_н$ получают переменное напряжение $u_к$.

Л. — Твое смущение вызвано тем, что ты не делаешь различия между **статическими** и **динамическими** характеристиками. Первые показывают, как изменяются интересующие нас напряжения и токи при отсутствии в цепи коллектора сопротивления нагрузки. Такие характеристики мы рассматривали во время предшествующей беседы. Сегодня же мы выясним, что происходит, когда в цепь коллектора включено нагрузочное сопротивление, и, кроме того, ко входу, т. е. между базой и эмиттером, приложено переменное напряжение $u_б$ (рис. 52). Теперь следует говорить о динамических характеристиках, и проведенная нами нагрузочная прямая позволяет их определить.

ДВЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ

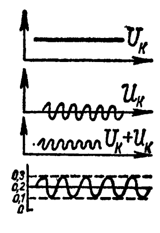


Н. — По твоей схеме я вижу, что входное переменное напряжение $u_б$ порождает выходное переменное напряжение $u_к$, и я начинаю догадываться о сути дела. Здесь в цепи коллектора происходит то же самое, что и в анодной цепи электронной лампы: мирное сосуществование двух токов. Во-первых, мы имеем постоянную составляющую — средний ток, определяемый рабочей точкой (у лампы — смещением сетки). И во-вторых, имеется переменная составляющая, определяемая изменением потенциала сетки по отношению к катоду. Полупериоды переменной составляющей входного напряжения то складываются с постоянной составляющей (когда обе составляющие имеют один знак), то вычитаются из нее.

Л. — Дело начинает идти лучше, дорогой Незнайкин. Действительно, у транзистора происходит аналогичное явление. Батареи $E_{к-э}$ и $E_{б-э}$ определяют рабочую точку. Целесообразно установить ее так, чтобы и положительные, и отрицательные полупериоды входного переменного напряжения могли создавать максимальные отклонения напряжения коллектора от его среднего значения.

Н. — В этом случае мы должны условиться, что среднее напряжение $U_к$ на коллекторе должно быть равно половине напряжения питания $E_{к-э}$. В нашем случае это половина от 9 *в*, т. е. 4,5 *в*.

Л. — Я ставлю точку *P* на нашей нагрузочной прямой в месте, соответствующем $U_к=5$ *в*, это почти середина нашей прямой. Ты сейчас увидишь, что можно выбрать величину, несколько большую половины $E_{к-э}$. Теперь, если изменение напряжения база — эмиттер (или, что то же самое, изменение тока базы) определяет изменение тока $I_к$ и напряжения $U_к$ коллектора, то эти две последние величины всегда оказываются связанными отношением, которое выражает наша прямая.



Н. — Это чересчур философски, и я предпочел бы конкретный пример.

КАЧЕЛИ

Л. — Хорошо, допустим, что ты прикладываешь между базой и эмиттером переменное напряжение с амплитудой примерно в 20 *мв*, которое создает изменения тока базы с амплитудой в 0,1 *ма* по одну и по другую сторону от среднего тока, величина которого в точке *P* составляет 0,2 *ма*.

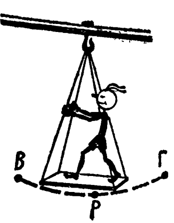
Н. — В результате ток базы изменяется, принимая следующие крайние значения:

$$0{,}2+0{,}1=0{,}3\ ма \text{ и } 0{,}2-0{,}1=0{,}1\ ма.$$

Л. — Совершенно верно, при первом значении мы достигнем на нашей прямой точки *В* (где нагрузочная прямая пересекает кривую $I_б=0{,}3$ *ма*), а при втором значении мы дойдем до точки *Г* (место пересечения с кривой $I_б=0{,}1$ *ма*).

Н. — Значит, мгновенные значения $u_к$ и $i_к$ колеблются между точками *В* и *Г* вдоль нагрузочной прямой, как если бы они качались на качелях вокруг точки равновесия *P*.

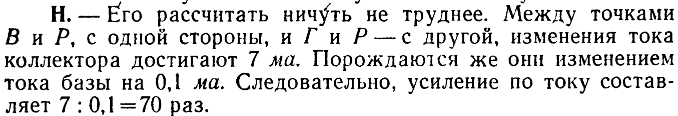
Л. — Правильно, ты видишь, что напряжение коллектора колеблется в обе стороны от точки *P* между 3,2 и 6,8 *в*.



Н. — Следовательно, амплитуда составляет 1,8 *в*, так как средняя точка *P* соответствует напряжению 5 *в*. И если это

происходит при амплитуде напряжения на базе 20 *мв*=0,02 *в*, то можно ли сделать вывод, что усиление по напряжению составляет 1,8 : 0,02=90 раз?

Л. — Пожалуйста. А каково усиление по току?



Н. — Его рассчитать ничуть не труднее. Между точками *В* и *Р*, с одной стороны, и *Г* и *Р* — с другой, изменения тока коллектора достигают 7 *ма*. Порождаются же они изменением тока базы на 0,1 *ма*. Следовательно, усиление по току составляет 7 : 0,1 =70 раз.

Л. — Я начинаю думать, что ты, совершая набеги на рыбный магазин, изрядно зарядил свой мозг фосфором... Теперь ты понимаешь, что мощность, которая выражается произведением напряжения на ток, подвергалась усилению в...

Н. — ... 90×70=6 300 раз. Просто колоссально!

БЕРЕГИСЬ ИСКАЖЕНИЙ

Л. — Совершенно нормально, но я хотел, чтобы ты понял, что амплитуда переменного напряжения на коллекторе не должна превышать 4,5 *в*. При такой амплитуде значения $u_к$ и $i_к$ будут перемещаться вдоль всей нагрузочной прямой от точки *А* до точки *Б*. Действительно, допустив, что рабочая точка находится строго посередине линии *АБ*, мы увидим, что один полупериод достигает одного конца этой линии, а другой — противоположной точки.

Н. — Одним словом, это предельные мгновенные значения напряжения коллектора $u_к$?

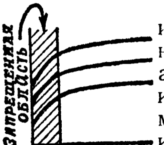
Л. — Да, но не следует допускать его падения до нуля (точки *Б*), так как характеристики там перестают быть прямыми. Ты видел на рис. 47 и еще более ясно на рис. 49, как резко они изгибаются при малых значениях $U_к$. Вот почему остается зона в несколько десятых долей вольта, именуемая о б л а с т ь ю н а с ы щ е н и я, вхождение в которую запрещено из-за искажений.

Н. — А не полезно ли в связи с этим немного сдвинуть точку *Р* с средины прямой *АБ* в сторону большего напряжения?

Л. — Конечно, если хотят быть требовательными. Вот почему мы выбрали для этой точки напряжение 5 *в* [1].

Н. — У меня сложилось впечатление, что 275 *ом* в качестве нагрузочного резистора $R_н$ ты взял тоже не случайно. Что было бы при ином сопротивлении?

БУКЕТ ИЗ ПРЯМЫХ

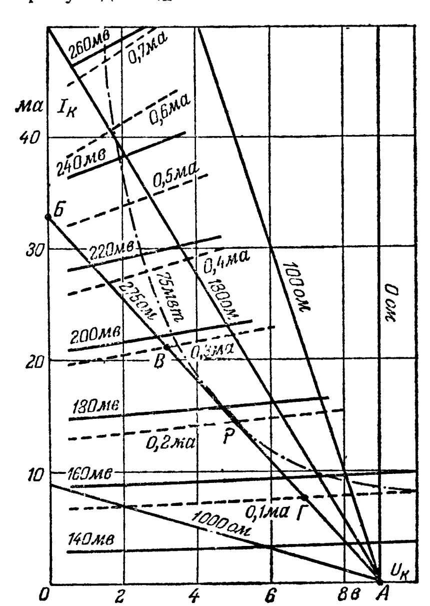


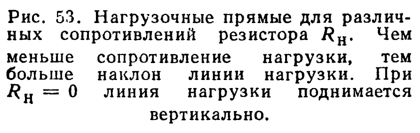
Л. — Вот несколько нагрузочных прямых для бо́льших или меньших нагрузок (рис. 53). На нагрузке 1 000 *ом* мощности выделяется меньше, так как мы располагаем меньшими амплитудами изменений токов как на входе (тока базы), так и на выходе (тока коллектора). Нагрузки с сопротивлением, меньшим 275 *ом*, увеличивают амплитуды и мощности, но, используя такие нагрузки, мы попадаем в запрещенную область мощностей выше 75 *мвт*.

---

[1] Любознайкин несколько лукавит: он выбрал для точки *Р* 5 *в* больше всего для того, чтобы эта точка оказалась на характеристике $I_б$=0,2 *ма*, что облегчает расчеты по определению различных значений напряжений и токов.

Н. — Так вот почему ты, великий хитрец, избрал эту величину 275 *ом*, которая позволяет получить нагрузочную кривую в виде касательной к гиперболе, обозначающей предельную допустимую мощность... Минутку, я вижу, что ты даже провел нагрузочную кривую для $R_н = 0$.




Рис. 53. Нагрузочные прямые для различных сопротивлений резистора $R_н$. Чем меньше сопротивление нагрузки, тем больше наклон линии нагрузки. При $R_н = 0$ линия нагрузки поднимается вертикально.

Л. — Да, Незнайкин, эта строго вертикальная прямая линия — единственная среди наших нагрузочных прямых, описывающая статический режим транзистора. Разве при отсутствии сопротивления нагрузки напряжение на коллекторе не остается постоянным и неизменным?

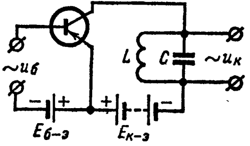
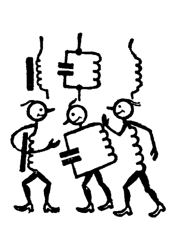


Рис. 54. В качестве нагрузки может использоваться не только омическое сопротивление. На этом рисунке нагрузкой служит колебательный контур *LC*, настроенный на частоту сигнала.

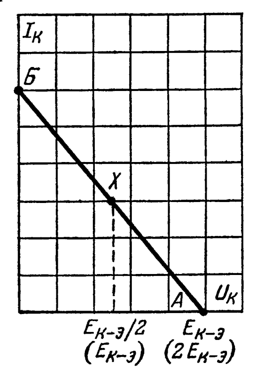
Н. — Это очевидно. Но разве некогда не изучали мы с тобой другие сопротивления нагрузки, кроме банального омического сопротивления? У меня еще осталось в голове это симпатичное семейство реактивных сопротивлений, с которыми мы тогда познакомились: индуктивности, колебательные контуры (рис. 54)...



Л. — Ты хорошо сделал, что напомнил мне о них. Разумеется, что при расчете такого рода цепей часто не учитывают омического сопротивления катушек постоянному току. В этих условиях рабочая точка коллектора совпадает с напряжением источника питания $E_{к-э}$. Тогда без риска изменить

полярность коллектора можно развивать на реактивных сопротивлениях напряжения, амплитуда которых достигает величины $E_{к-э}$. При этом точка *А* (где обычная нагрузочная прямая пересекает горизонтальную ось $U_к$) может соответствовать удвоенной величине напряжения батареи $E_{к-э}$. Так, если оно равно 9 *в*, то точка *А* находится при напряжении 18 *в*.

Н. — Подводя итоги, следует сказать, что для проведения нагрузочной прямой я ставлю точку *А*, откладывая на горизонтальной оси величину $E_{к-э}$, если в цепь коллектора непосредственно включена омическая нагрузка ($R_н$), или $2E_{к-э}$,



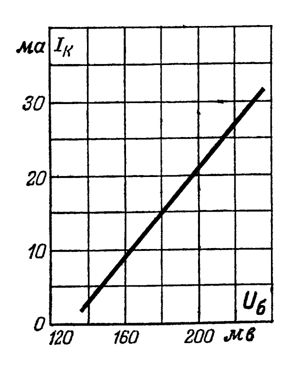
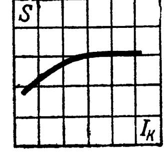


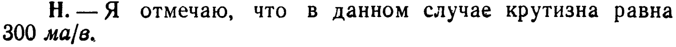
Рис. 55. Общее правило для определения нагрузочных прямых. В скобках указаны значения для случаев, когда сопротивление резистора $R_н$ цепи нагрузки постоянному току значительно меньше ее эквивалентного сопротивления $R_э$ для переменного тока.

Рис. 56. Эта характеристика, показывающая зависимость тока коллектора $I_к$ от напряжения базы $U_б$ при наличии сопротивления нагрузки, построена на основании выходных характеристик и нагрузочной прямой, изображенных на рис. 51.

если в качестве нагрузки выступает эквивалентное сопротивление $R_э$ цепей, содержащих реактивности и обладающих малым сопротивлением постоянному току (колебательный контур, трансформатор). Соответственно точку *Б* я ставлю на вертикальной оси, откладывая $E_{к-э}/R_н$ и $E_{к-э}/R_э$ (где $R_э$ — эквивалентные сопротивления нагрузки) в зависимости от характера сопротивления нагрузки (рис. 55).

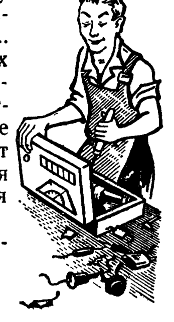
Л. — Ты исключительно точно сформулировал правило, и я надеюсь, что ты сам без малейшего труда сумеешь провести нагрузочные прямые и, пользуясь ими, сможешь получить кучу интересных данных. Например, нет ничего проще, исходя из имеющихся сведений, вычертить кривую, показывающую, как изменяется ток коллектора $I_к$ в зависимости от напряжения на базе $U_б$. Для этого достаточно снять по нагрузочной прямой значения $I_к$ для всех точек, где она пересекает характеристики, соответствующие различным значениям $U_б$, и перенести их на график. Ты увидишь, что в этом случае мы получим прямую (рис. 56). Это показывает, что изменения крутизны невелики, когда мы имеем дело с большими значениями коллекторного тока, т. е. усиление транзистора имеет достаточно линейный характер.




Н. — Я отмечаю, что в данном случае крутизна равна 300 *ма/в*.

Л. — Да, это динамическая крутизна. С такой же легкостью ты можешь вычертить график, показывающий изменения $I_к$ в зависимости от $I_б$.

ОДНА БАТАРЕЯ — ВСЕ НАПРЯЖЕНИЯ



Н. — Конечно. Но, как попавшая в паутину муха, я спешу вырваться из паутины характеристик, которая наяву заставляет меня вновь переживать приснившиеся мне кошмары... Уже давно с языка у меня готов сорваться вопрос. На всех твоих схемах ты изображал две батареи: $E_{к-э}$, дающую напряжение на коллектор, и $E_{б-э}$, служащую источником соответствующего смещения базы. Однако я вскрыл все транзисторные приемники у своих друзей и убедился, что все они имеют только по одной батарее. Это, очевидно, батарея, питающая коллектор. Откуда же поступает напряжение смещения на базу?

Л. — От этой же батареи. Впрочем, разве в ламповых схемах ты не сталкивался с таким же положением?

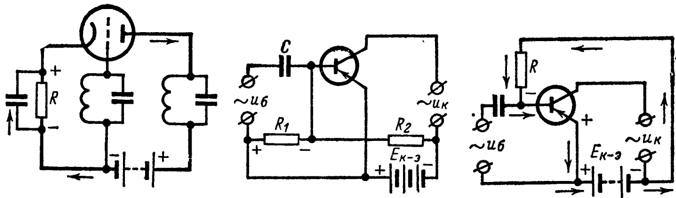
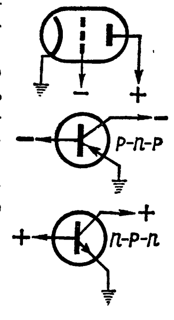


Рис. 57. Так в ламповой схеме создается сеточное смещение за счет падения напряжения на резисторе R, введенном в цепь катода.

Рис. 58. Подача напряжения смещения на базу при помощи делителя напряжения.

Рис. 59. Довольно часто напряжение смещения создается с помощью резистора R, включенного последовательно с переходом база — эмиттер.

Н. — Действительно, напряжение сеточного смещения создается источником анодного напряжения; анодный ток вызывает падение напряжения на резисторе R (рис. 57), включенном в цепь катода, в результате чего последний становится положительным по отношению к сетке или, иначе говоря, сетка становится отрицательной по отношению к катоду... Поступают ли так же в схемах с транзисторами, создавая падение напряжения на резисторе, установленном на пути коллекторного тока?



Л. — Нет, Незнайкин. На этот раз с транзисторами дело обстоит проще, чем с лампами. У лампы анод должен быть положительным, а сетка отрицательной по отношению к катоду. А у транзистора типа *p-n-p* и коллектор, и база должны быть отрицательными по отношению к эмиттеру.

Н. — Точно так же у транзистора типа *n-p-n* и коллектор и база должны быть положительными по отношению к эмиттеру. Я понял: для того чтобы база имела нужное напряжение, достаточно воспользоваться делителем напряжения из двух резисторов, присоединенным к той же батарее, от которой питается цепь коллектор — эмиттер (рис. 58).

Л. — Правильно, мой друг. А чтобы подать на базу переменное входное напряжение, преградив ответвление постоянного тока базы в предшествующие цепи, применяют разделительный конденсатор *C*. Однако подать на базу необходимое ей смещение можно еще проще с помощью только одного резистора *R* (рис. 59), присоединив его к тому же полюсу батареи $E_{к-э}$, с которым соединен коллектор.

Н. — Я вижу, что происходит. Ты пропускаешь через резистор *R* ток, идущий от базы к эмиттеру.

Л. — Этот ток, Незнайкин, называется током смещения. Именно он определяет положение рабочей точки на нагрузочной прямой. Так, для точки *P* на рис. 51 необходим ток 0,2 *ма*, или 0,0002 *а*. Пусть напряжение батареи 9 *в*, а небольшим сопротивлением эмиттерного *p-n* перехода можно пренебречь (ты помнишь, что в проводящем направлении сопротивление *p-n* перехода весьма мало?) Можешь ли ты рассчитать необходимое сопротивление резистора *R*?

Н. — Если верить закону Ома, то *R* получим, разделив 9 на 0,0002, что даст нам 45 000 *ом*, или 45 *ком*.

Л. — Как видишь, все наши расчеты по своей сложности не превышают простого умножения и деления...

Н. — И тем не менее у меня голова идет кругом от этих кривых, прямых и месива электрических величин. Пусть все это уляжется до нашей новой встречи...



БЕСЕДА ВОСЬМАЯ

КЛИН КЛИНОМ

В схемах на электронных лампах охотно прибегают к обратной связи с целью уменьшить искажения и ослабить влияние колебаний напряжения питания. В схемах на транзисторах обратная связь может принести такую же пользу, а кроме того, она в известной мере может нейтрализовать воздействие изменений температуры, к которым полупроводниковые приборы, как известно, очень чувствительны.

Рассматривая эти различные применения обратной связи, наши друзья установят, что транзистор по своей природе имеет некоторую внутреннюю обратную связь. Это больше, чем что бы то ни было, доказывает, что у этого полупроводникового прибора все зависит от всего...

Содержание: Преимущества схем с обратной связью. Обратная связь по току и по напряжению. Схемы на лампах и на транзисторах. Влияние обратной связи на входное и выходное сопротивления. Фазовые искажения, вносимые транзисторами. Внутренняя обратная связь. Появление искажений при повышении температуры и их ослабление с помощью обратной связи. Применение терморезисторов.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ ПРЕВОСХОДИТ ВЫМЫСЕЛ



Любознайкин. — Что я вижу, Незнайкин? Ты сжигаешь целую кучу книг! Что означает это сожжение?

Незнайкин. — Я предаю огню свою библиотеку научно-фантастической литературы. Зачем хранить эти фантастические романы о будущем, если действительность далеко превзошла воображение их авторов? И в связи с этим я хотел задать тебе вопрос относительно этих колоссальных шаров-спутников, которые должны на высоте 35 000 *км* вращаться вокруг Земли, делая один оборот за 24 *ч*, в результате чего они всегда будут оставаться над одной и той же точкой земного шара.

Л. — Ты прекрасно знаешь, что они позволяют установить дальнюю связь, так как радиоволны будут отражаться от их металлизированной оболочки. С помощью этих шаров можно осуществлять обмен телевизионными передачами на очень больших расстояниях.



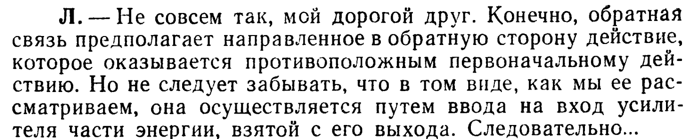
Н. — Это я знал, но в этой истории с искусственными спутниками меня заинтересовало то, что шары надуваются уже после их выхода на орбиту, что, как мне кажется, сильно усложняет дело.

Л. — Что ты, Незнайкин! Разве ты не понимаешь, что шары такого диаметра в надутом состоянии абсолютно не способны пролететь через земную атмосферу со скоростью 8 *км/сек*. Напротив, в пустоте, которая царит на высоте, где они находятся, ничто не препятствует их движению.

Н. — Я признаю твой удар, и мне стыдно, что я до этого не додумался. И тем не менее я знаю добрый старый закон Ньютона, гласящий, что каждое действие встречает равное ему противодействие, направленное в противоположную сторону. Очевидно, это то противодействие, которое некогда изучали в радиотехнике под названием **обратной связи**.

ВОПРОСЫ КОРРЕКЦИИ





Л. — Не совсем так, мой дорогой друг. Конечно, обратная связь предполагает направленное в обратную сторону действие, которое оказывается противоположным первоначальному действию. Но не следует забывать, что в том виде, как мы ее рассматриваем, она осуществляется путем ввода на вход усилителя части энергии, взятой с его выхода. Следовательно...

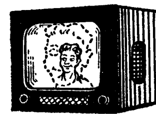


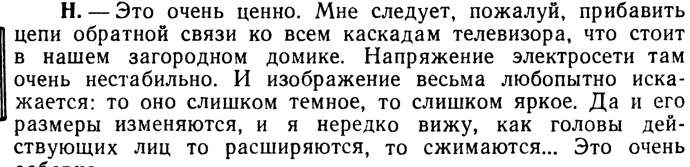
Н. — ... это своего рода удар в обратную сторону. Нечто похожее происходит со мной, когда, совершив глупость, чтобы исправиться, я хочу ударить себя ногой по затылку...

Л. — Слово «исправить» в этом случае как нельзя более к месту. Действительно, позволь напомнить тебе, что обратная связь своего рода утешительное средство от всех бед: она уменьшает все искажения — частотные, нелинейные и, наконец, фазовые.

Н. — Да, я вспоминаю. Все, что ты назвал, ослабляется благодаря тому, что напряжение, повторно вводимое на вход, содержит в противофазе все эти искажения. Поступая в обратном направлении, они компенсируют возникающие в самом усилителе искажения.

Л. — Браво, Незнайкин! Ты ничего не забыл. А знаешь ли ты, что, кроме этого, обратная связь уменьшает искажения, которые могут возникать из-за колебаний напряжения питания?





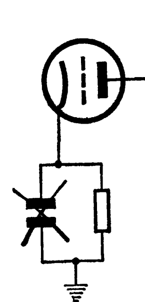
Н. — Это очень ценно. Мне следует, пожалуй, прибавить цепи обратной связи ко всем каскадам телевизора, что стоит в нашем загородном домике. Напряжение электросети там очень нестабильно. И изображение весьма любопытно искажается: то оно слишком темное, то слишком яркое. Да и его размеры изменяются, и я нередко вижу, как головы действующих лиц то расширяются, то сжимаются... Это очень забавно.

Л. — Для таких случаев обратная связь хорошее средство, так как все появляющиеся на выходе искажения исправляются путем частичного возвращения на вход искаженного сигнала. Однако в твоем случае целесообразнее поставить между розеткой электросети и телевизором стабилизатор напряжения.

Н. — Почему? Ведь обратная связь имеет только положительные качества?

ВОЗВРАЩЕНИЕ К ЛАМПАМ

Л. — Мой друг, ты еще слишком молод и не знаешь, что за все приходится платить: если обратная связь уменьшает искажения, то она также снижает коэффициент усиления усилителя. Вот почему ее применение возможно лишь в том случае, если имеется запас усиления... Если уж мы начали об этом говорить, то не мог бы ты, Незнайкин, начертить основные схемы обратной связи, используемые в усилителях на лампах?



Н. — Обратную связь можно создать, включив между катодом и отрицательным полюсом источника анодного напряжения резистор $R_{о.с}$ без блокировочного конденсатора (рис. 60, *а*). За исключением этой детали, схема совпадает с нарисованной мною в прошлый раз схемой сеточного смещения на резисторе в цепи катода (рис. 57). Но эта «небольшая деталь» все изменяет. Теперь, если под действием усили-

ваемого сигнала сетка становится более положительной, анодный ток возрастает и, проходя через резистор $R_{o.c}$, увеличивает на нем падение напряжения, что в свою очередь делает сетку более отрицательной. Таким образом, анодный ток пытается оказать противодействие влиянию первичного сигнала

Л. — Прекрасно, Незнайкин, ты начинаешь изъясняться так же ясно, как мой дядюшка Радиоль, который некогда вбил мне в голову элементарные принципы радиотехники... Твоя схема создает обратную связь под воздействием анодного тока, и она называется последовательной обратной связью или обратной связью по току.

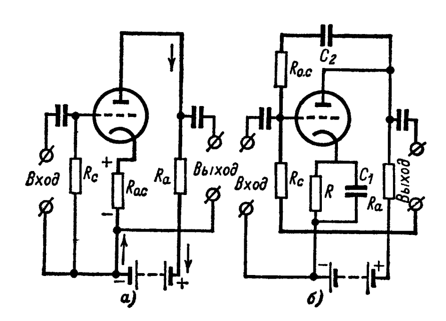
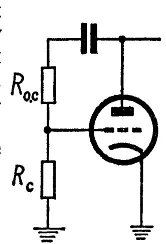


Рис. 60. Обратная связь в ламповом каскаде.

а — обратная связь по току (обусловлена общим для цепей сетки и анода резистором $R_{o.c}$); *б* — обратная связь по напряжению (достигается подачей на сетку части переменного напряжения с резистора R_a при помощи делителя напряжения $R_{o.c}$ R_c через конденсатор C_2).

Н. — Раз так, то параллельную обратную связь или обратную связь по напряжению можно создать при помощи второй моей схемы (рис. 60, *б*), так как здесь я ввожу на сетку переменное напряжение, создаваемое на выходном резисторе R_a. Я осуществляю это с помощью резистора $R_{o.c}$ и, разумеется, отделяю постоянное напряжение конденсатором C_2.



Л. — Правильно. Подаешь ли ты на сетку все входное напряжение?

Н. — О нет, этого было бы слишком много. Резисторы $R_{o.c}$ и R_c образуют делитель напряжения, позволяющий подавать на сетку только остающуюся на резисторе R_c часть выходного напряжения, и так как величина $R_{o.c}$ подбирается значительно большей, чем величина R_c, сетка получает лишь небольшую часть выходного напряжения.

ПЕРЕХОД К ТРАНЗИСТОРУ

Л. — Своими блестящими объяснениями ты значительно облегчил мою задачу, потому что я как раз собирался рассказать тебе об обратной связи в транзисторных схемах. Вот относящиеся к транзисторам схемы обратной связи по току

и по напряжению (рис. 61). Различают также последовательную и параллельную обратную связь [1].

Н. — Позволь мне разобраться в них самому. На твоей первой схеме (рис. 61, *а*) резистор $R_{о.с}$ — общий для цепей базы и коллектора подобно тому, как на моей ламповой схеме (рис. 60, *а*) тот же резистор — общий для цепей сетки и анода.

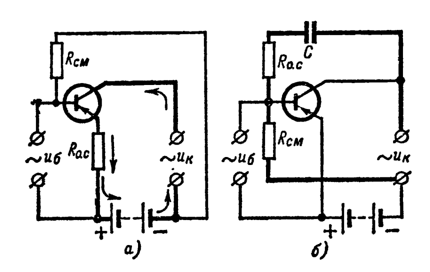


Рис. 61. Применение к транзисторам обоих методов создания обратной связи, показанных на рис. 60.

а — обратная связь по току (последовательно); *б* — обратная связь по напряжению (параллельная).

Следовательно, действия этих резисторов аналогичны. Если ты позволишь, я воспользуюсь нашим испытанным методом полярностей.

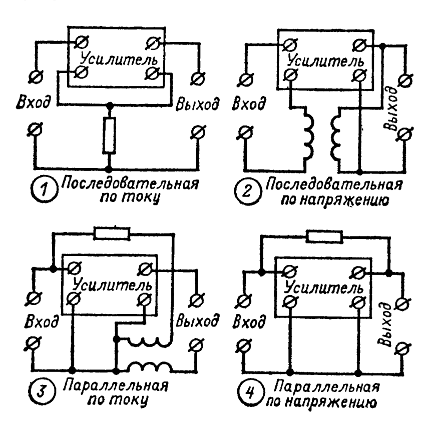
Л. — Пожалуйста, я даже прошу тебя об этом.

Н. — Допустим, что один полупериод сигнала на входе увеличит отрицательное напряжение на базе. Ток коллектора возрастает, и в результате падения напряжения на резисторе $R_{о.с}$ эмиттер тоже станет более отрицательным. Но это зна-





[1] На практике различают четыре вида обратной связи, схематически представленные на наших рисунках. Обратная связь может прилагаться к входу усилителя последовательно или параллельно с первоначальным сигналом. Она может порождаться выходным током (обратная связь по току) или напряжением, которое этот ток создает на выходной нагрузке. Схемы *1* и *4* чаще применяются в однокаскадных усилителях. Схемы *2* и *3* чаще встречаются в усилителях, оканчивающихся трансформатором, причем обратной связью охватываются сразу 2—3 каскада.

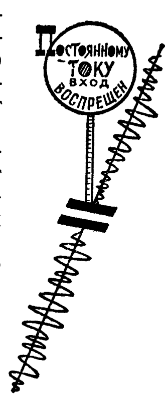


чит, что напряжение базы относительно эмиттера изменится в направлении, обратном первоначальному. Из сказанного следует, что в этом случае мы имеем отрицательную обратную связь, так как ответный удар противоположен первому.



Л. — Ты прекрасно проанализировал создавшееся положение. Перейдем теперь ко второй схеме (рис. 61, *б*).

Н. — Там тоже бросается в глаза аналогия со схемой на лампе (рис. 60, *б*). Ты ловко использовал резистор смещения базы $R_{см}$, чтобы вместе с резистором $R_{о.с}$ создать делитель для отвода напряжения с выхода на вход. Здесь часть выходного напряжения $u_к$ прикладывается между базой и эмиттером и, разумеется, в противофазе. Кроме того, конденсатор C, свободно пропуская переменные напряжения, отделяет постоянные; поэтому постоянный потенциал базы не зависит от резистора $R_{о.с}$.



Л. — Прекрасно, попутно обрати внимание, что если конденсатор C имеет недостаточную емкость, то он хуже будет пропускать низкие частоты, которые поэтому в меньшей степени, чем высокие, будут подвергаться воздействию обратной связи.

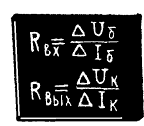
Н. — Иначе говоря, усиление низких частот будет понижаться в меньшей мере. Это явление используется в одном из способов регулировки тембра, правда, на мой взгляд, не особенно удачном, так как при этом не все искажения нейтрализуются одинаково. Но такая регулировка тембра должна быть весьма полезной для портативных приемников; она сделает их менее крикливыми.

Л. — Я вижу, что аккумуляторы твоего мозга хорошо заряжены фосфором. Поэтому я без колебаний прошу тебя сделать небольшое усилие и сказать мне, что станет с входным и выходным сопротивлениями транзистора при использовании последовательной обратной связи.



ЕЩЕ НЕМНОГО О «ДЕЛЬТАХ»

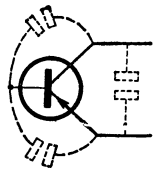
Н. — Вспомним, что входное сопротивление представляет собой отношение малых изменений напряжения базы к вызываемым ими малым изменениям тока базы. Здесь в связи с обратной связью прежние изменения напряжения на входе будут оказывать меньшее влияние на ток базы. Иначе говоря, для того же значения $\Delta U_б$ мы получим меньшую величину $\Delta I_б$. Следовательно, их отношение, являющееся входным сопротивлением, повысится.



Л. — Ты хорошо рассудил, Незнайкин. Я не хотел бы полностью разряжать твои умственные аккумуляторы и потому сразу скажу, что если бы ты таким же образом проанализировал поведение выходного сопротивления, то увидел бы, что от обратной связи оно также увеличивается. Что же касается параллельной обратной связи, то она вызывает снижение как входного, так и выходного сопротивления.

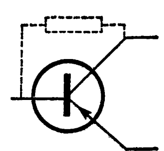
Н. — Меня все больше и больше приводит в смущение сходство транзистора со знакомой с детства кухонной батареей из связанных кастрюль. Стоит прикоснуться к чему-нибудь, как все приходит в движение. Действительно, стоит ли применять обратную связь, чтобы еще больше запутывать дело?

Л. — Уже не думаешь ли ты, Незнайкин, что ее применяют лишь для того, чтобы отравить тебе жизнь? Обратная связь снижает искажения, которые у транзисторов столь же опасны, как и у электронных ламп, и дает те же преимущества



относительно фазовых искажений, так как у транзисторов, используемых для усиления на низких частотах, емкости между эмиттером, базой и коллектором имеют относительно большую величину, отчего страдает фаза усиливаемых сигналов. Кроме того, когда начинает падать напряжение батарей, обратная связь благодаря своему регулирующему эффекту еще в течение некоторого времени поддерживает работоспособность транзисторной аппаратуры.

ЕЩЕ ОДНА ОБРАТНАЯ СВЯЗЬ



Н. — Такое поведение обратной связи, очевидно, очень ценно, так как это служит прекрасным средством экономии.

Л. — Я вижу, что возможность снижения денежных расходов помирила тебя с обратной связью. Заметь попутно, что даже если ты и не захочешь ею пользоваться, то ты все равно обязан смириться с ее невидимым присутствием.

Н. — Что это за таинственность?

Л. — Транзистору присуща в н у т р е н н я я обратная связь, которая почти полностью отсутствует у ламп. Своим существованием она обязана сопротивлению коллекторного перехода, которое составляет несколько сотен килоом и оказывается включенным непосредственно между коллектором и базой.

Н. — Как проявляет себя эта внутренняя обратная связь?

Л. — Так же, как только что рассмотренная параллельная обратная связь в схеме на рис. 61, *б*. Ее даже можно измерить; для этого нужно изменять напряжение коллектора и измерять возникающие изменения напряжения базы. Практически изменение напряжения $u_б$ в несколько тысяч раз меньше вызывающего его изменения напряжения $u_к$. Иначе говоря, коэффициент внутренней обратной связи имеет в среднем величину 0,05%. Его обозначают греческой буквой μ (ми) или чаще символом h_{12}.

Н. — Я испытываю к тебе чувство благодарности за то, что ты милостиво оставил мне возможность дать определение коэффициента внутренней обратной связи: $\mu=\Delta u_б/\Delta u_к$. Но так как величина μ очень мала, то влиянием внутренней обратной связи, наверно, можно пренебречь.

Л. — Да, при условии, что сопротивление нагрузки мало по сравнению с выходным сопротивлением, что на практике часто и бывает.



ВОПРОС О ФАЗЕ

Н. — Ты, очевидно, догадываешься, Любознайкин, что я горю желанием перейти к изучению практических схем. Я обещал своему дяде Жюлю собрать усовершенствованный транзисторный приемник, который он мог бы взять с собой в Африку, где он хочет полечить свой ревматизм на солнце. Я намереваюсь сделать двухкаскадный усилитель низкой частоты. Могу ли я сделать общую обратную связь на оба каскада, подав напряжение с выхода на вход?



Л. — Да, однако в транзисторных схемах не следует делать обратную связь больше чем на два каскада, так как из-за внутренних емкостей, о которых я тебе только что говорил, в каждом каскаде происходит дополнительный сдвиг фазы. И если сделать обратную связь больше чем на два каскада,

то дополнительный сдвиг может оказаться настолько большим, что заранее не узнаешь, какую фазу в результате получишь.

Н. — Иначе говоря, появится риск получить вместо отрицательной обратной связи положительную.

Л. — И в этом нет ничего удивительного... Но вот схема, которая должна тебе понравиться (рис. 62). В ней как раз два низкочастотных каскада с резистивно-емкостной связью. С выхода через конденсатор C мы снимаем с помощью резисторов R_1 и R_2 часть напряжения, чтобы подать его на эмиттер первого транзистора.

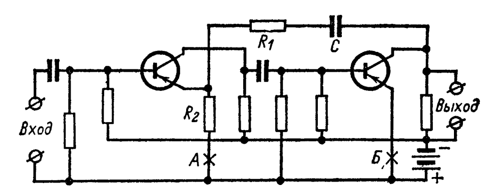


Рис. 62. Смещенная (последовательно-параллельная) схема обратной связи, охватывающей два каскада усилителя низкой частоты.

Н. — Ну и что дальше? Почему не на базу, как мы делали это в схеме с одним каскадом?

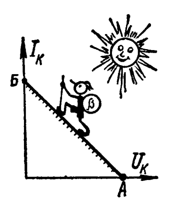


Л. — Потому что каждый каскад переворачивает фазу. Поэтому после двух каскадов сигнал должен совпадать по фазе с напряжением, приложенным ко входу. Значит, не может быть и речи о подаче выходного напряжения на базу (вместо отрицательной обратной связи мы получили бы ужасное самовозбуждение). Подавая же напряжение с выхода на эмиттер, мы создадим благоприятную отрицательную обратную связь. А кроме того, резистор R_2 сам создаст в первом каскаде эффект последовательной обратной связи.

Н. — Чудесно! Вот схема, которая даст счастье моему дяде.

КАВЕРЗЫ ЮЖНОГО СОЛНЦА

Л. — Боюсь, что нет, так как насколько лучи тропического солнца будут благотворны для дяди, настолько они будут вредны для радиоприемника.



Н. — Ах, да: я забыл о неприятностях, которые влечет нагрев полупроводниковых приборов. Может быть, следовало бы положить пузырь со льдом на приемник? А для начала скажи мне, как сказывается на работе радиоприемника увеличение тока транзисторов, вызываемое повышением температуры.

Л. — Я дал себе слово не говорить сегодня о характеристиках, которыми ты, кажется, изрядно насыщен. Просто представь себе, Незнайкин, что начальный ток коллектора удваивается при каждом повышении температуры на 8° С, следовательно, при повышении температуры от нуля до +40° С ток может увеличиться в 32 раза. Это значит, что все выходные характеристики резко сместятся вверх. В результате рабочая точка (которая, позволь тебе напомнить, лежит при пересечении нагрузочной прямой с одной из коллекторных характеристик), влекомая общим передвижением характеристик



вверх, переместится влево, вместо того чтобы находиться посередине нагрузочной прямой. Прощай тогда наша красивая симметрия! Прощай исключительная линейность усиления...

Н. — Какое бедствие! Ты меня сразил..., но не слишком, ибо я знаю твой метод: ты повергаешь меня в самую глубокую скорбь, а затем как фокусник, вытаскивающий из цилиндра кролика, показываешь мне средство, которое спасает положение. Ну, так вытаскивай своего кролика!

Л. — Ты уже знаком с ним: нас еще раз спасет обратная связь. Являясь эффективным средством борьбы с искажениями, она поможет нам и в предотвращении медленных изменений режима питания, вызываемых влиянием температуры.

Рис. 63. Схема температурной стабилизации рабочей точки за счет последовательной обратной связи по постоянному току.

Н. — Значит, рассмотренные нами схемы обратной связи одновременно служат и для компенсации влияний температуры.

Л. — В известной мере да, когда они создают обратную связь и по постоянному току (схемы, показанные на рис. 61, *б* и 62, под этот случай не попадают). Но в принципе для этой цели нужна более глубокая обратная связь.

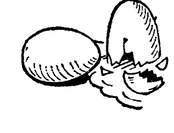
Н. — Но тогда она будет слишком сильной для наших усиливаемых сигналов и чрезмерно снизит их усиление. Какой выход можешь ты предложить из этой «пиковой» ситуации?

Л. — Оставим в стороне сопротивления обратной связи, корректирующие усиливаемые сигналы, и займемся сопротивлениями, компенсирующими влияние температуры. В этом случае можно воспользоваться последовательной обратной связью, выполненной вот по такой схеме (рис. 63).

«МАЛЕНЬКАЯ ДЕТАЛЬ»

Н. — Но я не замечаю существенного отличия от прежней схемы последовательной обратной связи для переменной составляющей напряжения: ты добавил только один конденсатор *C*.

Л. — Но это именно та «маленькая деталь», которая изменяет все. Этот конденсатор (обычно электролитический) имеет большую емкость и представляет для переменных токов значительно меньшее препятствие, чем резистор $R_{о.с}$. Поэтому через резистор $R_{о.с}$ будет проходить только постоянная составляющая тока, и только она будет подвержена влиянию обратной связи.



Н. — просто и остроумно, как яйцо Христофора Колумба. Но что делать, если мы одновременно пожелаем иметь обратную связь и по переменной составляющей?

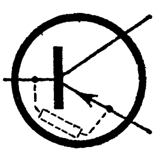
Л. — Ничто не мешает нам включить в точке *А* последовательно с резистором $R_{о.с}$ другой резистор обратной связи, который мы не будем блокировать конденсатором.

Н. — Это очевидно. А можно ли для стабилизации рабочей точки применить параллельную обратную связь по напряжению?

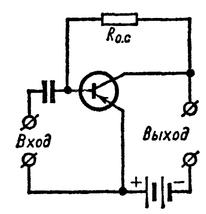
Л. — Разумеется, но тогда убирают конденсатор, который мы раньше включали как раз для того, чтобы не пропустить

постоянную составляющую. На базу подают одновременно часть переменного и постоянного напряжения коллектора (рис. 64).

Н. — Но я не вижу здесь второго плеча делителя напряжения, который должен использоваться для достижения этой цели.



Л. — И это не случайно. Его функции выполняет входное сопротивление транзистора (сопротивление промежутка база — эмиттер). Если же ты хочешь создать параллельную обратную связь только по постоянному току, то и здесь можно с помощью конденсатора устранить обратную связь по переменной



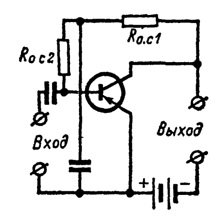


Рис. 64. Схема температурной стабилизации рабочей точки за счет параллельной обратной связи.

Рис. 65. Та же схема, что и на рис. 64, но с развязкой переменной составляющей.

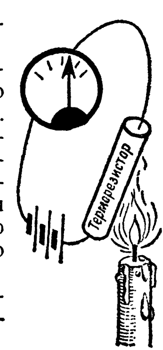
составляющей, если составить сопротивление $R_{о.с}$ из двух последовательно соединенных резисторов $R_{о.с1}$ и $R_{о.с2}$ (рис. 65).

Н. — Но вернемся к моему дяде; если я правильно понял, то можно скомпенсировать влияние температуры на схему усилителя (рис. 62), включив резисторы в точках *А* и *Б*.

Л. — Совершенно верно. При этом первое из них следует заблокировать конденсатором большой емкости, чтобы оно не усиливало чрезмерно обратную связь по переменному току... Но я еще не рассказал тебе об одном очень остроумном методе устранения неблагоприятной реакции полупроводниковых приборов на изменения температуры. Метод заключается в использовании самого тепла для борьбы с его влиянием.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕДОСТАТКОВ

Н. — Ты это серьезно? Уж не хочешь ли ты стать гомеопатом, чтобы лечить одно зло другим?



Л. — Именно так и следует меня понимать. Если нагревание увеличивает ток через полупроводник, то это означает, что при повышении температуры его сопротивление понижается. Значит, из полупроводниковых материалов можно сделать резистор, сопротивление которого быстро падает при повышении температуры. Вот характеристика одного из таких резисторов, называемых **терморезисторами** (рис. 66). Ты видишь, что когда температура повышается, скажем, от 20 до 40° С, то сопротивление термистора снижается примерно на 45%.

Н. — Я спрашиваю тебя, как ты используешь плохо переносящий жару резистор для нейтрализации причиняемого жарой вреда.



Л. — Очень просто. Я включаю его в делитель напряжения, подающий смещение на базу (рис. 67). Верхнее плечо делителя образует обычный резистор R_1. Другое плечо состоит из терморезистора, зашунтированного резистором R_3 и включенного последовательно с резистором R_2. Что же происходит при повышении температуры?

Н. — Сопротивление терморезистора уменьшается, и это вызывает снижение сопротивления всего нижнего плеча, состоящего из R_2, R_3 и терморезистора.

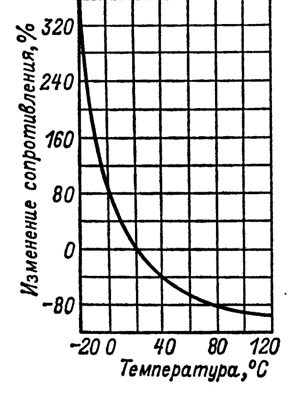


Рис. 66. Изменение сопротивления терморезистора в зависимости от температуры.

Поскольку же сопротивление резистора R_1 верхнего плеча не уменьшается (а может быть, даже несколько увеличивается при повышении температуры), потенциал базы становится менее отрицательным. Это вызывает уменьшение тока коллектора. Вот здорово!

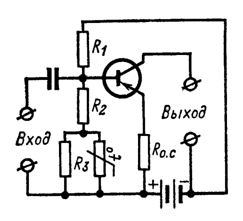
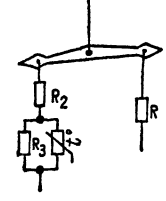


Рис. 67. Компенсация влияния температуры с помощью терморезистора, управляющего потенциалом базы.

Л. — Как видишь, высшее искусство в жизни заключается в том, чтобы превратить недостатки вещей в положительные качества, что мы здесь и сделали.

Н. — Но зачем ты усложнил схему, введя в нее резисторы R_2 и R_3?



Л. — Это сделано для осуществления точной компенсации. Нужно, чтобы сопротивления резисторов были рассчитаны соответствующим образом. Иногда можно убрать то или иное из них, если характеристика терморезистора точно соответствует нашим задачам.

Н. — Я чувствую, что мое собственное сопротивление падает, так как мой мозг слишком перегрелся.

Л. — Ну, тогда оставим его в покое.

◎

БЕСЕДА ДЕВЯТАЯ

ОЭ—ОБ—ОК

В ходе предшествующих бесед Любознайкин и Незнайкин приобрели прочные знания о работе транзисторов, используемых в качестве усилителей. Для этого они проанализировали наиболее употребительную схему, где усиливаемые сигналы прилагаются между базой и эммитером, а после усиления снимаются между коллектором и эмиттером. Это соответствует классической ламповой схеме. Однако транзисторы, так же как и электронные лампы, в некоторых случаях могут применяться и в других схемах включения. Поэтому, прежде чем перейти к практическому применению транзисторов, полезно изучить их работу в этих других схемах.

Содержание: Ламповые схемы с заземленным катодом, сеткой или анодом. Транзисторные схемы с общим эмиттером, общей базой или общим коллектором. Усиление по току и напряжению в трех основных типах схем. Их входные и выходные сопротивления. Сводная таблица характеристик трех схем включения транзисторов.

ЭЛЕМЕНТ СЛУЧАЙНОСТИ В ИСТОРИИ ИЗОБРЕТЕНИЙ

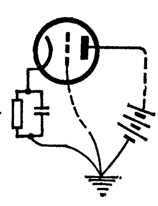
Незнайкин. — Как случилось, что транзистор был изобретен на сорок лет позднее электронной лампы? Ведь на первый взгляд проще ввести примеси в полупроводник, чем создать вакуум в стеклянном баллоне и нагреть в нем катод, эмиттирующий электроны через сетку к аноду.



Любознайкин. — В истории изобретений иногда случай играет первостепенную роль, и транзистор мог бы быть изобретен раньше электронной лампы. Впрочем, одному русскому инженеру, О. В. Лосеву, еще в 1922 г. при экспериментах с кристаллами цинковой обманки удалось генерировать и усиливать электрические колебания. Однако его прибор, названный «кристадином», не получил дальнейшего развития. Но если бы транзистор был изобретен раньше электронной лампы, то появление вакуумной лампы, несомненно, приветствовали бы как крупное усовершенствование... И для вакуумных триодов стали бы применять различные схемы включения, используемые теперь для транзисторов. Так мы получили бы схемы с заземленным катодом, заземленной сеткой и с заземленным анодом.

Н. — Что за вездесущее заземление?

ТРИ ОСНОВНЫЕ ЛАМПОВЫЕ СХЕМЫ



Л. — Ты, Незнайкин, очевидно, помнишь, что под заземлением мы понимаем точку с постоянным потенциалом. В обычной схеме лампового усилителя это точка, где сходятся цепи сетки и анода.

Н. — Мне кажется, что концы обеих этих цепех сходятся на катоде.

Л. — Поэтому наиболее распространенная ламповая схема называется схемой с заземленным катодом (рис. 68), даже если между катодом и заземленной точкой включен резистор

смещения, так как для переменных токов он практически накоротко замкнут конденсатором. А кроме того, разве ты забыл о существовании схемы с заземленной сеткой (рис. 69)?

Н. — Действительно, мы встречались с ней, когда изучали частотную модуляцию. Используемая для усиления сигналов высокой частоты эта схема позволяет лучше отделить входную цепь от выходной; при этом сетка служит защитным экраном. А управляющим электродом в этом случае оказывается катод.

Л. — Остается еще третья возможность: сделать постоянным потенциал анода, заземлив его (разумеется, через источ-

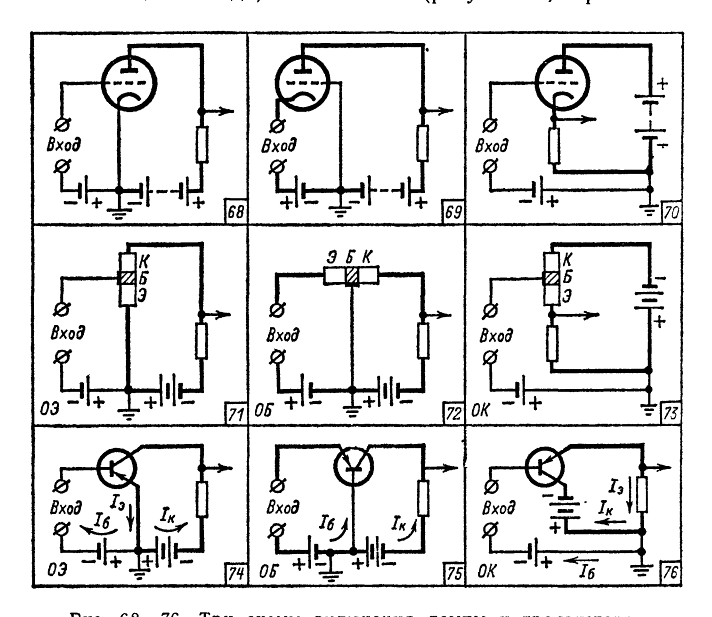
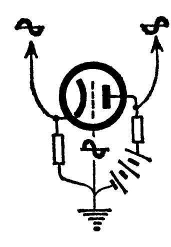


Рис. 68—76. Три схемы включения лампы и транзистора.

68 — наиболее распространенная схема лампового усилителя с заземленным катодом; *69* — схема с заземленной сеткой; *70* — схема с заземленным анодом (катодный повторитель); *71* — наиболее распространенная схема транзисторного усилителя с общим эмиттером; *72* — схема с общей базой; *73* — схема с общим коллектором; *74—76* — другой вариант начертания трех основных транзисторных схем.

На рисунке наглядно показано, как ток эмиттера $I_э$ разделяется в общей точке на две части: ток базы $I_б$ и ток коллектора $I_к$.



ник высокого напряжения), приложить входной сигнал между сеткой и заземленной точкой, а снимать усиленное напряжение с сопротивления нагрузки, включенного между катодом и этой точкой (рис. 70).

Н. — Странная схема. Впрочем, в этом случае через нагрузочный резистор все равно проходит анодный ток, так что на нем выделяется и усиленное напряжение.

Л. — Употребив выражение «усиленное напряжение», ты был неправ, ибо коэффициент усиления этой схемы, именуемой катодным повторителем, меньше единицы. В ней сопротивление нагрузки действует как сопротивление обратной связи, в результате чего схема не может создавать выходное напряжение больше входного.

Н. — Значит, эта схема не представляет никакого интереса?

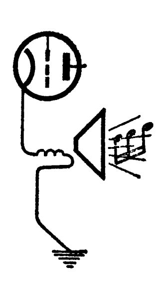
Л. — Совсем наоборот. Прежде всего отметь себе, Незнайкин, что напряжение, возникшее на сопротивлении нагрузки, совпадает по фазе с напряжением, приложенным к сетке.

Н. — Именно по этой причине схема и отличается такой небывало сильной отрицательной обратной связью?

Л. — Разумеется. Но если ты включишь второе сопротивление нагрузки в анодную цепь, т. е. обычным способом...

Н. — ...то здесь выходное напряжение окажется в противофазе с напряжением на входе. Значит, одна и та же лампа позволит получить два выхода с напряжениями в противоположных фазах. Какая удобная схема для подачи сигнала на сетки ламп двухтактного каскада!

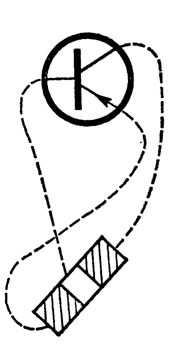
Л. — Это верно, но катодный повторитель часто используется и в других случаях, когда нужно получить малое выходное сопротивление, ибо, хотя, как я вижу, ты и сомневаешься, сопротивление нагрузки, включаемое в катодную цепь, можно взять значительно меньшим, чем сопротивление, включаемое в анодную цепь. Можно даже непосредственно включить в цепь катода звуковую катушку громкоговорителя и обойтись без выходного трансформатора, устранив таким образом источник значительных искажений.

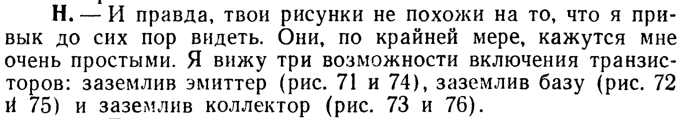


Н. — Ты положительно убедил меня в достоинствах катодного повторителя, но я уже изучил и тебя и твои приемы. Если ты с таким жаром говоришь мне о трех схемах включения ламп, то, несомненно, только ради того, чтобы затем проанализировать соответствующие схемы на транзисторах.

ТРАНЗИСТОРНЫЙ ВАРИАНТ

Л. — От тебя положительно ничего нельзя скрыть. Действительно, каждой из этих трех схем соответствует свой способ включения транзистора. Для большей ясности я начертил каждую из них в двух вариантах (рис. 71—76). В первом случае (рис. 71—73) транзистор изображен в виде прямоугольника, каким мы обозначали его сначала; на таком рисунке лучше виден путь тока между тремя областями транзистора, и иногда я сожалею, что такое обозначение транзистора не было принято повсеместно. Во втором случае (рис. 74—76) эти же схемы нарисованы с обычным условным обозначением транзистора, но здесь в ущерб красоте рисунка я постарался более четко показать цепь тока коллектора. А для большей наглядности я выделил жирными линиями и анодные цепи ламп на рис. 68—70.





Н. — И правда, твои рисунки не похожи на то, что я привык до сих пор видеть. Они, по крайней мере, кажутся мне очень простыми. Я вижу три возможности включения транзисторов: заземлив эмиттер (рис. 71 и 74), заземлив базу (рис. 72 и 75) и заземлив коллектор (рис. 73 и 76).

Л. — Правильно, но наличие заземления необязательно, и правильнее эти три схемы называть так: схема с *общим эмиттером* (ОЭ), схема с *общей базой* (ОБ) и схема с *общим коллектором* (ОК).

Н. — Понимаю: суть заключается в том, что в каждой из них одна из трех зон транзистора является общей для входной и выходной цепей... И я оказался в положении Журдена, этого мещанина во дворянстве, который не знал, что говорил

прозой, так как, разбирая вместе с тобой схему с ОЭ, я не предполагал, что она так называется.

Л. — Мы долго занимались этой схемой, потому что она применяется значительно чаще других.

Н. — Так же, как схема с общим катодом для ламп.

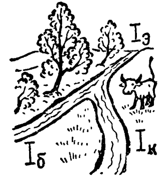
Л. — Разумеется. Ты знаешь, что при правильном использовании эта схема может дать прекрасное усиление как по току, так и по напряжению, а следовательно, и по мощности. Я хочу напомнить тебе, что выходное напряжение в схеме с ОЭ имеет фазу, противоположную входному напряжению, что входное сопротивление составляет несколько сотен ом, а выходное — несколько десятков килоом.

УСИЛИТЕЛЬ ЛИ ЭТО?

Н. — Все это крепко запечатлелось в моей памяти. Можно ли мне пуститься в путешествие в неизведанные дали и попытаться проанализировать схему с ОБ?

Входное напряжение здесь также прикладывается между эмиттером и базой, но на этот раз роль входного электрода выполняет эмиттер, а база остается пассивной. Если входной сигнал вызывает увеличение положительного потенциала эмиттера относительно базы, то ток базы увеличивается, возрастает и ток коллектора; в результате падение напряжения на сопротивлении нагрузки также увеличивается, а выходной потенциал становится более положительным. Напряжение на выходе в этом случае несомненно находится в фазе с напряжением на входе.

Л. — Твои рассуждения совершенно правильны, но неполны, так как ты не рассмотрел, каким в этом случае будет усиление по току.



Н. — Здесь кое-что меня смущает. Во входной цепи мы имеем ток эмиттера $I_э$, а в выходной — только ток коллектора, который несколько меньше, так как ток эмиттера (это отчетливо видно на рисунке) делится на два тока: ток базы $I_б$ и ток коллектора $I_к$. А что верно для токов, то верно и для их небольших изменений. Следовательно, усиление по току, т. е. отношение малых изменений выходного тока $\Delta I_к$ к малым изменениям входного тока $\Delta I_э$, меньше единицы, так как ток $I_э$ больше тока $I_к$. Это скорее ослабление, а не усиление[1].

---

[1] Это «усиление», обозначенное буквой α, можно легко представить, записав, что

$$\alpha = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_к + \Delta I_б},$$

потому что $\Delta I_э = \Delta I_к + \Delta I_б$.

Разделив числитель и знаменатель на $\Delta I_б$, получим:

$$\alpha = \frac{\Delta I_к / \Delta I_б}{\Delta I_к / \Delta I_б + 1}.$$

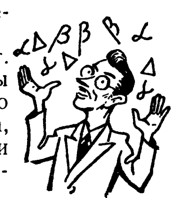
Отсюда видно, что α меньше единицы. Выражение $\Delta I_к / \Delta I_б$, как мы помним, есть усиление по току в схеме с общим эмиттером, которое мы обозначаем буквой β. Следовательно,

$$\alpha = \frac{\beta}{1 + \beta}.$$

Для транзисторов с большим коэффициентом β значение α приближается к единице, иначе говоря, изменения тока на выходе и входе примерно одинаковы.

Л. — Да, и его обозначают букной α, а в схеме с ОЭ усиление по току обозначается буквой β.

Н. — По-моему, нелогично давать первую букву греческого алфавита схеме, которая реже применяется.



Л. — Это имеет свои исторические причины, мой друг. На заре транзисторов были известны только точечные типы транзисторов, и только схема с ОБ позволяла стабильно применять эти приборы. Хронологически это первая схема, и поэтому фирмы-изготовители часто дают характеристики для такого, хотя и устаревшего, метода включения транзисторов.

Н. — Значит, отвлекаясь от уважения к древним вещам, схема с ОБ не представляет никакого интереса, так как она, вместо того чтобы усиливать сигнал, ослабляет его.

СХЕМА ИМЕЕТ НЕ ТОЛЬКО ИСТОРИЧЕСКИЕ ЗАСЛУГИ

Л. — Вот опасности выводов столь же поспешных, как и окончательных, так характерных для молодого поколения... Схема с ОБ во многих случаях представляет интерес. Она облегчает построение наиболее высокочастотных усилителей, причем обеспечивает неплохое усиление.



Н. — Ты что смеешься надо мной, называя усилением коэффициент меньше единицы?..

Л. — Успокойся, мой друг. Ведь это было сказано применительно к усилению по току. Но обычно нас интересует усиление по напряжению и особенно усиление по мощности. А в этом смысле положение более чем удовлетворительное. Чтобы ты мог убедиться в этом сам, я должен тебе сказать, что входное сопротивление схемы с ОБ очень мало и на практике составляет несколько десятков ом.

Н. — Ничего удивительного для меня в этом нет, потому что оно определяется отношением малых изменений напряжения на входе к вызываемым им изменениям тока. В отличие от схемы с ОЭ здесь мы имеем дело с током эмиттера, а он изменяется очень сильно, следовательно, отношение имеет очень малую величину.

Л. — Ты хорошо рассудил, Незнайкин. Но в противовес входному сопротивлению выходное сопротивление для схемы с ОБ может быть очень большим — порядка мегома.

Н. — Какое же я ничтожество! Я только сейчас понял, что изменения выходного тока хотя примерно и равны изменениям входного тока, но на большом выходном сопротивлении создают напряжения, во много раз превышающие напряжение сигнала, приложенного к низкоомному входному сопротивлению. Действительно, мы должны иметь хорошее усиление по напряжению.



Л. — Да, это усиление может достигать несколько тысяч раз, а поэтому мы можем также получить хорошее усиление по мощности. К несчастью, этим нельзя должным образом воспользоваться.

Н. — Ты, Любознайкин, подвергаешь меня настоящему шотландскому душу — бросаешь из жара в холод. Едва только схема с ОБ была реабилитирована, как ты начинаешь ее дискредитировать. Почему?

Л. — Потому что после нашего каскада с ОБ могут следовать другие, у которых входное сопротивление намного

меньше, чем выходное сопротивление у схемы с ОБ, что приведет к потере выигрыша в усилении, полученного благодаря этому высокому выходному сопротивлению.

ТРЕТЬЯ СХЕМА

Н. — На этот раз с меня хватит! Я не хочу больше слышать об этой проклятой схеме с ОБ. И я надеюсь, что схема с ОК будет менее обманчивой.

Л. — Прежде чем приступить к анализу этой схемы, я хочу заметить, что на практике встречаются два варианта ее построения. В одном из них батарея питания коллектора находится между общим проводом (заземлением) и коллектором (рис. 77), а во втором — между нагрузочным сопротивлением и общим проводом, с которым коллектор соединен непосредственно (рис. 78). Во втором варианте база автоматически получает смещение по отношению к эмиттеру.

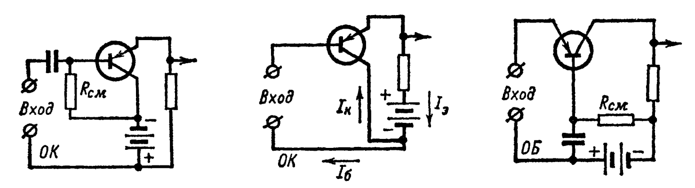
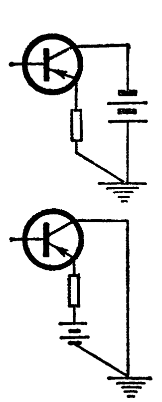


Рис. 77. Способ смещения для схемы, показанной на рис. 76.

Рис. 78. Возможный вариант схемы с общим коллектором, отличающийся от приведенной на рис. 76 схемы местом включения источника коллекторного напряжения.

Рис. 79. Способ смещения для схемы, показанной на рис. 75.

Н. — Тогда в первом варианте нужно иметь специальную батарею смещения?



Л. — Совсем нет. Простой резистор $R_{см}$, установленный между базой и отрицательным полюсом батареи, выполнит эту задачу точно так же, как это имеет место в схеме с ОЭ. Пользуясь случаем, я привожу также практическую схему смещения для схемы с ОБ (рис. 79).

Н. — К великой радости продавцов батарей, я предпочел бы иметь две батареи, как это показано на наших теоретических схемах... Но вернемся к схеме с ОК. В этом случае, как я вижу, при усилении тоже не происходит изменения фазы: более отрицательный потенциал на базе увеличивает ток эмиттера, что вызывает большее падение напряжения на нагрузочном резисторе, и верхний конец его становится более отрицательным (рис. 77) или, что одно и то же, менее положительным (рис. 78).

Л. — О да, Незнайкин, из наших трех схем только схема с ОЭ изменяет фазу усиливаемого напряжения. Разберем теперь, какое усиление по току можно получить в схеме с ОК.

Н. — На входе этой схемы мы имеем ток базы, который, как и всегда, очень мал, а на выходе мы получим самый большой из трех токов — ток эмиттера. Следовательно, эта схема должна дать еще большее усиление по току, чем схема с ОЭ.

Нет ли у тебя возражений, если я вновь прибегну к греческому алфавиту и обозначу это усиление буквой γ (гамма) [1]?

Л. — Я не думаю, чтобы греки возразили против такого решения. Ты в восторге, и я вижу, тебе не терпится поскорее познакомиться с этой так хорошо усиливающей схемой, но мне вновь придется опрокинуть ушат холодной воды на твой юношеский энтузиазм.



Н. — Я чувствую, что ты нанесешь мне жесткий удар, заявив, что здесь внутренние сопротивления имеют противоположное значение, чем в схеме с ОБ, и что поэтому наше прекрасное усиление по току нам ничего не дает.

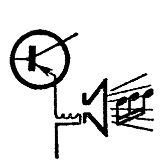
Л. — Я не скрываю от тебя эту печальную истину. Как в ламповой схеме катодного повторителя, так и в схеме с ОК для транзисторов входное сопротивление может достигать 1 *Мом*, тогда как выходное сопротивление составляет всего лишь несколько десятков ом.

Н. Прямая противоположность схеме с ОБ! Значит, мы не выигрываем ничего ни по напряжению, ни по мощности.

Л. — Ничего, Незнайкин, или почти ничего. Впрочем, ты мог сам прийти к такому выводу, заметив, что сопротивление нагрузки в этой схеме создает очень сильную отрицательную обратную связь. Когда полупериод сигнала стремится сделать базу отрицательной по отношению к эмиттеру, повышая ток последнего, то это увеличение тока делает эмиттер более отрицательным, что препятствует действию сигнала на входе.

Н. — Для чего же применяется эта схема, которая не может дать нам никакого усиления по напряжению?

Л. — Она используется в некоторых случаях, когда необходимо получить большой ток, например для раскачки мощного транзистора, или же когда низкое выходное сопротивление необходимо для лучшего согласования с сопротивлением нагрузки, например при непосредственном включении звуковой катушки громкоговорителя.



Н. — Я еще раз убеждаюсь в справедливости старинной истины о золотой середине. У транзисторов этой золотой серединой бесспорно является схема с ОЭ, где входное и выходное сопротивления имеют добрые средние значения, что позволяет получить подходящее усиление как по току, так и по напряжению, и по мощности.

Л. — Ты прав, Незнайкин. Входное $R_{вх}$ и выходное $R_{вых}$ сопротивления представляют собой как бы две чаши весов, которые примерно уравновешены в схеме с ОЭ; для схемы с ОБ чаша $R_{вх}$ резко уходит вниз, а при схеме с ОК — сильно поднимается вверх. Если ты пообещаешь мне никому не говорить, я открою тебе один секрет: для одного транзистора произведение $R_{вх} \cdot R_{вых}$ остается неизменным во всех трех схемах включения.

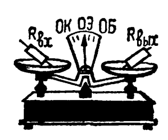


[1] Усиление по току в схеме с ОК

$$\gamma = \frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_к + \Delta I_б}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} + \frac{\Delta I_б}{\Delta I_б} = \beta + 1.$$

Как видно, в схеме с ОК усиление по току несколько больше, чем в схеме с ОЭ. Между коэффициентами усиления по току трех основных схем существует очень простое соотношение

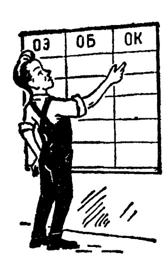
$$\alpha\gamma = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_э}\,\frac{\Delta I_э}{\Delta I_б} = \frac{\Delta I_к}{\Delta I_б} = \beta.$$



Н. — Значит, если, например, в схеме с ОЭ мы имеем $R_{вх} = 500$ *ом* и $R_{вых} = 20\,000$ *ом*, а их произведение равно 10 000 000, то для этого же транзистора в схеме с ОБ сопротивление $R_{вх}$ составляет, скажем, 50 *ом*, а $R_{вых} = 200\,000$ *ом*, и если в схеме с ОК $R_{вх} = 20\,000$ *ом*, то $R_{вых}$ должно иметь

Способ включения	ОЭ	ОБ	ОК
Схема			
Входное сопротивление $R_{вх}$	$\Delta U_б/\Delta I_б$ 200–2000 *ом*	$\Delta U_э/\Delta I_э$ 30–1500 *ом*	$\Delta U_б/\Delta I_б$ 0,2–1 *Мом*
Выходное сопротивление $R_{вых}$	$\Delta U_к/\Delta I_к$ 10–100 *ком*	$\Delta U_к/\Delta I_к$ 0,5–2 *Мом*	$\Delta U_э/\Delta I_э$ 50–500 *ом*
Усиление по току	$\beta = \Delta I_к/\Delta I_б$ 20–200	$\alpha = \Delta I_к/\Delta I_э$ <1	$\gamma = \Delta I_э/\Delta I_б$ 20–200
Усиление по напряжению	Несколько сотен	Несколько сотен или тысяч	Около единицы
Усиление по мощности	Несколько тысяч	Несколько сотен	Несколько десятков
Напряжение на выходе и входе	В противофазе	В фазе	В фазе
Использование	Универсальное. Усилитель и фазоинвертор	На наиболее высоких частотах. При работе на высокоомную нагрузку	При работе на низкоомную нагрузку или от высокоомного генератора

Рис. 80. Сводная таблица основных характеристик трех основных схем включения транзистора.



величину 50 *ом*... Если ты разрешишь, я в заключение попытаюсь составить таблицу (рис. 80) наиболее важных характеристик всех основных схем, чтобы их можно было легче сравнивать.

Л. — Прекрасная идея, она позволит нам приятно завершить нашу сегодняшнюю очень полезную беседу [1].

---

[1] В предшествующем примечании мы составили очень простое соотношение между коэффициентами усиления в трех основных схемах:

$$\beta = \alpha\gamma.$$

Следующая табличка позволяет выразить каждый из этих коэффициентов через два других:

Схема	ОЭ	ОБ	ОК
ОЭ	β	$\beta = \frac{\alpha}{1-\alpha}$	$\beta = \gamma - 1$
ОБ	$\alpha = \frac{\beta}{1+\beta}$	α	$\alpha = \frac{\gamma - 1}{\gamma}$
ОК	$\gamma = 1 + \beta$	$\gamma = \frac{1}{1-\alpha}$	γ

ДВА ПИСЬМА

ВОПРОСЫ СОГЛАСОВАНИЯ

Так же как и для ламп (а может быть, и в других случаях) проблема согласования сопротивлений имеет первостепенное значение в расчете схем на транзисторах.

Однако Незнайкину из-за недостатка знаний основ электротехники трудно разобраться в этой сложной проблеме. Поэтому Любознайкин должен восполнить этот пробел, изложив некоторые элементарные понятия, которые даже многие техники-практики недостаточно усвоили... (разумеется, что читатель, знающий, что такое согласование сопротивлений, пропустит без внимания эпистолярные упражнения наших друзей).

Содержание: Источник и режим его нагрузки. Электродвижущая сила и внутреннее сопротивление. Напряжение на зажимах. Генератор напряжения. Генератор тока. Оптимальные условия передачи мощности. Согласование сопротивлений. Применение трансформатора. Оптимальный коэффициент трансформации.

ПИСЬМО НЕЗНАЙКИНА ЛЮБОЗНАЙКИНУ

Дорогой друг Любознайкин!

Если сингапурский грипп и лишает меня удовольствия побеседовать с тобой, то он не мешает мне думать обо всем, что ты объяснил мне во время нашей последней встречи.

Я убедился, что ты придаешь очень большое значение вопросу входного и выходного сопротивлений. Они изменяются в зависимости от избранной схемы, а ты неоднократно отмечал целесообразность согласования сопротивлений.

Я признаюсь, что не очень хорошо понял твои объяснения. И я чувствую себя подобно полупроводнику типа p: у меня дырки (в знаниях).

Не мог бы ты их заполнить? Заранее благодарю тебя.

Твой друг Незнайкин.

ОТВЕТ ЛЮБОЗНАЙКИНА НЕЗНАЙКИНУ

Бедный мой Незнайкин!

Все несчастия сразу! Грипп и дырки...

Первым займется твой врач, а я постараюсь устранить второе.

Да, проблема согласования сопротивлений очень важна, и я хочу, чтобы ты ее хорошо усвоил.

Во всех схемамх, которые мы с тобой должны будем рассмотреть, задача сводится к тому, чтобы передать электрическую энергию от одного каскада к другому с минимальными потерями, иначе говоря, с максимальной эффективностью или к. п. д

Следовательно, всегда имеется отправитель и адресат. Первый является по отношению ко второму источником энергии (генератором), а второй, получающий энергию, — потребителем (нагрузкой). Одним словом, их взаимоотношения напоминают отношения поставщика и потребителя (рис. 81).

Генератор → Нагрузка

Рис. 81. Вот как в самой общей форме можно представить передачу энергии от источника (генератора) к нагрузке (потребителю) в любой электрической цепи.

Извини меня, Незнайкин, за то, что я преподношу тебе азбучные истины, придав им философскую форму. На практике ты постоянно имеешь дело с такими генераторами и нагрузками. С генераторами ты встретишься не только на электростанции: генератором является, например, батарейка карманного фонарика, а нить питаемой ею лампочки служит нагузкой.

Антенна радиоприемника, являющаяся источником сигналов, поступающих на вход приемника, — это тоже генератор, а входная цепь приемника, в которую вводится сигнал от антенны, — его нагрузка. Точно так же мощная оконечная лампа является генератором для нагрузки — громкоговорителя.

В схемах на транзисторах выходня цепь каждого транзистора представляет собой генератор энергии для входной цепи следующего каскада, выступающего в роли нагрузки.

Но стоит ли умножать количество примеров? Нужно хорошо понять, что любой источник энергии — генератор — характеризуется двумя величинами:

1) электродвижущей силой (э. д. с.) — максимальным напряжением, которое источник способен дать на выходе; это, если хочешь, его жизненная сила;

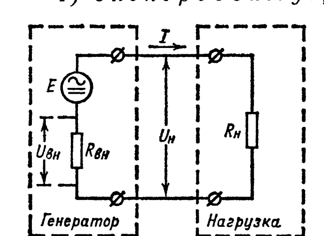


Рис. 82. Переменная или постоянная э. д. с. E источника создает ток I, проходящий через внутреннее сопротивление генератора $R_{вн}$, на котором возникает падение напряжения $U_{вн}$, и через нагрузку $R_н$, на которой появляется напряжение $U_н$.

2) внутренним сопротивлением, т. е. сопротивлением, которое он оказывает, как и любой другой элемент электрической цепи, проходящему через него току (рис. 82).

На этом внутреннем сопротивлении генератора $R_{вн}$, разумеется, происходит падение напряжений за счет тока, создаваемого самим источником. Поэтому напряжение $U_н$ на зажимах источника, а следовательно, и на нагрузочном резисторе $R_н$ будет меньше э. с. д. E. Разница между э. д. с. и напряжением на нагрузке тем значительней, чем больше ток I. Естественно, что если нагрузка отключена, то напряжение источника равно его э. д. с. В этом случае говорят, что генератор находится в режиме холостого хода.

Рискуя вызвать у тебя повышение температуры, я предлагаю тебе внимательно рассмотреть следующий очень элементарный расчет. Пусть общее сопротивление будет $R_{вн}+R_н$. Следовательно, по закону Ома ток

$$I=\frac{E}{R_{вн}+R_н}.$$

На внутреннем сопротивлении $R_{вн}$ этот ток создаст падение напряжения

$$U_{вн}=\frac{E}{R_{вн}+R_н}R_{вн},$$

а на сопротивлении нагрузки $R_н$ — падение напряжения

$$U_н=\frac{E}{R_{вн}+R_н}R_н.$$

Если ты еще имеешь силы держать карандаш, то сложи эти два напряжения; в итоге получишь:

$$U_{вн}+U_н=E,$$

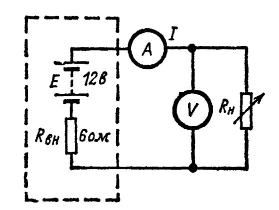
что и следовало ожидать. Ты видишь, что э. д. с. делится на два напряжения: $U_{вн}$, представляющее собой внутреннее падение напряжения, и $U_н$ — напряжение на нагрузке (оно же на зажимах источника). Это распределение происходит пропорционально сопротивлениям генератора и нагрузки.

Если внутреннее сопротивление генератора очень мало по сравнению с сопротивлением нагрузки, то и падение напряжения в генераторе тоже очень мало, а напряжение на нагрузке почти равно э. д. с. E. В этих условиях переменная э. д. с. проявляется на сопротивлении нагрузки в виде переменного напряжения, и поэтому говорят, что питание производится от генератора напряжения, причем режим его работы близок к холостому ходу.

Разберем теперь обратный случай, когда внутреннее сопротивление $R_{вн}$ источника значительно больше сопротивления нагрузки $R_н$. При этом почти вся э. д. с. будет теряться в виде внутреннего падения напряжения в генераторе, а напряжение $U_н$, остающееся на зажимах и прикладываемое к сопротивлению нагрузки, составит незначительную часть э. д. с. генератора. При таких условиях основное значение имеет ток I, пропорциональный э. д. с. и практически не зависящий от сопротивления нагрузки, так как ввиду его малости ток ограничивается по существу внутренним сопротивлением. В этом случае говорят, что питание производится от генератора тока, *причем режим его работы близок к* короткому замыканию.

При применении транзисторов можно столкнуться с обоими этими крайними случаями, но для достижения наилучшего к. п. д. и здесь следует придерживаться золотой середины.

При выборе схемы связи между каскадами с лампами мы стремимся подать на вход следующего каскада максимум напряжения. Здесь добрая фея устроила все наилучшим образом, так как вход сетка-катод обычно имеет бесконечно большое сопротивление, а потому на него передается вся э. д. с.,



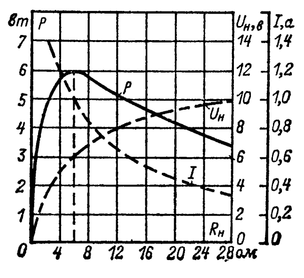


Рис. 83. Экспериментальная схема для изучения режимов нагрузки, позволившая снять кривые, показанные на рис. 84. Внутреннее сопротивление источника $R_{вн}$ изображено отдельно от условного обозначения батареи; в действительности же оно свойственно самой батарее. Чтобы не вносить погрешность в измеряемые значения токов и напряжений, нужно применять амперметр A с очень низким и вольтметр V с очень высоким сопротивлением.

Рис. 84. Зависимость мощности P, напряжения $U_н$ и тока I от сопротивления нагрузки $R_н$. Внимание! Масштабы, в которых приведены P, $U_н$ и I — разные.

развиваемая в выходной цепи предшествующего каскада. Это типичный пример возбуждения от генератора напряжения.

А вот при применении транзисторов, мой дорогой Незнайкин, характер явлений меняется: чтобы на входную цепь подать напряжение, надо затратить определенную мощность, *потому что какой бы ни была схема, через входные зажимы транзистора обязательно проходит ток. Образно говоря, лампы удовлетворяются вольтами, а транзисторы, на которые подаются вольты, одновременно поглощают амперы. А вольты на амперы дают ватты.*

Задача передачи мощности не столь проста — суди сам: мы стремимся передать в нагрузку максимальную мощность, т. е. наибольшее значение тока при самом высоком напряжении (рис. 83).

Хочешь ли ты выяснить, каким должно быть сопротивление нагрузки, чтобы получить наилучший результат? Если оно мало по сравнению с сопротивлением генератора, то ток будет больше. Тем лучше! Но тогда из-за повышенного падения напряжения внутри источника напряжения напряжение на этом сопротивлении нагрузки будет меньше. Тем хуже!

Сделаем наоборот. Возьмем сопротивление нагрузки значительно большее, чем сопротивление генератора. Тогда (как и в ламповых схемах) мы передадим на нагрузку почти всю э. д. с. Тем лучше! А ток будет меньше. Тем хуже!

Ты догадываешься, Незнайкин, что в этом случае наилучшим решением

окажется наша «золотая середина»: сопротивление нагрузки не должно быть ни больше, ни меньше сопротивления генератора. Иначе говоря, отдача наибольшей мощности происходит тогда, когда сопротивление нагрузки равно сопротивлению генератора. Когда это условие выполнено, то говорят, что сопротивления согласованы.

Чтобы лучше тебя в этом убедить, я не поленился составить графики зависимости отдаваемой в нагрузку мощности P, тока I и напряжения $U_н$ (для источника с э. д. с. $E = 12$ в и внутренним сопротивлением $R_{вн} = 6$ ом) от сопротивления нагрузки $R_н$ (рис. 84). Ты видишь, что по мере увеличения $R_н$ уменьшается ток I и возрастает напряжение U, их произведение быстро достигает максимума при $R_н = R_{вн} = 6$ ом, а затем медленно убывает. Разве это не достаточно убедительно?

Однако не думай, что оптимальные условия передачи энергии всегда требуют исключительно точного согласования сопротивлений. Другие требования, такие как хорошая линейность, могут заставить выбрать соотношение между $R_н$ и $R_{вн}$, значительно отличающееся от согласования.

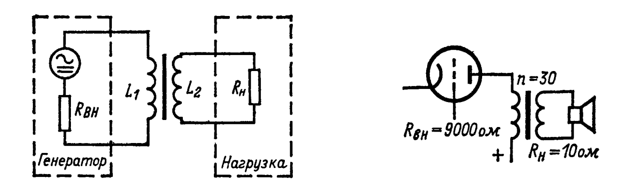


Рис. 85. Для согласования различных сопротивлений генератора и нагрузки применяют трансформатор с соответствующим отношением витков.

Рис. 86. Понижающий трансформатор позволяет согласовать малое сопротивление звуковой катушки громкоговорителя с высоким внутренним сопротивлением выходной лампы.

Но я предчувствую появление в твоей голове вопроса: как наладить сотрудничество генератора и нагрузки с очень различными сопротивлениями, не разбазаривая при этом слишком много мощности?

Действительно, как передать энергию на транзистор с малым входным сопротивлением от другого транзистора, имеющего большое выходное сопротивление? Как передать мощность от лампы с большим внутренним сопротивлением на низкоомную звуковую катушку громкоговорителя? Как, имея электродинамический микрофон с малым внутренним сопротивлением, подать сигналы на вход лампы усилителя, у которой входное сопротивление бесконечно велико?..

Ты угадываешь ответ: средством согласования сопротивлений должен служить твой старый знакомый — трансформатор; для этого, разумеется, подбирают соответствующее отношение между числами витков первичной и вторичной обмоток (рис. 85).

Само собой разумеется, что трансформируемое в цепь первичнй обмотки сопротивление нагрузки должно равняться внутреннему сопротивлению генератора. В свою очередь трансформируемое в цепь вторичной обмотки сопротивление генератора должно быть равно сопротивлению нагрузки. Для этого необходимо, чтобы индуктивные сопротивления были пропорциональны сопротивлениям цепей, в которые каждая из обмоток включена.

А ты знаешь, что индуктивное сопротивление обмотки равно ее индуктивности, умноженной на угловую частоту $\omega = 2\pi f$. Следовательно, обозначив индуктивность первичной и вторичной обмоток соответственно через L_1 и L_2, получим:

$$\frac{R_{вн}}{R_н} = \frac{\omega L_1}{\omega L_2} = \frac{L_1}{L_2}.$$

Я напомню тебе, что индуктивность в свою очередь пропорциональна квадрату числа витков. Обозначив число витков первичной и вторичной обмоток через ω_1 *и* ω_2*, мы можем записать:*

$$\frac{R_{вн}}{R_н} = \frac{L_1}{L_2} = \frac{\omega_1^2}{\omega_2^2} = \left(\frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2.$$

А что такое ω_1/ω_2*, Незнайкин? Вспомни, что отношение числа витков обмоток трансформатора называется* к о э ф ф и ц и е н т о м т р а н с ф о р м а ц и и *n. Следовательно, можно написать:*

$$\frac{R_{вн}}{R_н} = n^2 \quad \text{или} \quad n = \sqrt{\frac{R_{вн}}{R_н}}.$$

Этот результат имеет большое значение. Возьми для примера мощную лампу с внутренним сопротивлением $R_{вн} = 9\,000$ *ом (рис. 86). Если сигнал с нее должен подаваться на громкоговоритель, сопротивление звуковой катушки которого составляет 10 ом, то между ними нужно установить трансформатор с отношением витков первичной обмотки ко вторичной.*

$$n = \sqrt{\frac{9\,000}{10}} = \sqrt{900} = 30.$$

Но остановимся сегодня на этом, так как я не хочу препятствовать благотворному действию аспирина на твой организм. Желаю скорейшего выздоровления!

Твой друг Любознайкин

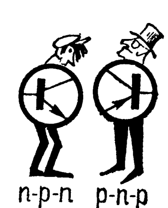
БЕСЕДА ДЕСЯТАЯ

СВЯЗИ ВСЕХ ВИДОВ

В ходе предыдущих бесед Любознайкин и Незнайкин изучили работу одиночного транзистора. Теперь они хотят рассмотреть схемы с несколькими транзисторами и способы связи транзисторов между собой. Цепи связи должны передавать последующему транзистору мощность, отдаваемую предшествующим транзистором. Как будет показано, кроме цепей связи, заимствованных из ламповой техники, здесь можно применять множество свойственных только транзисторам хитроумных комбинаций, которые сначала удивляют Незнайкина и вызывают у него бурный энтузиазм...

Содержание: Основные схемы с транзисторами структуры *n-p-n*. **Преимущества и недостатки трансформаторной связи. Регулировка громкости звука. Резистивно-емкостная связь. Емкость конденсатора связи. Схема с непосредственной связью. Усилитель постоянного тока. Схема с дополнительной симметрией. Тандем из двух транзисторов.**

О ТРАНЗИСТОРАХ *n-p-n*



Незнайкин. — Последнее время, мой дорогой Любознайкин, ты говорил мне лишь о транзисторах типа *p-n-p*, обращаясь с транзисторами типа *n-p-n*, как с бедными родственниками.

Любознайкин. — Для этого есть две причины: во-первых, тип *p-n-p* — самый распространенный, а во-вторых, все, что мы говорим о транзисторе типа *p-n-p*, может относиться

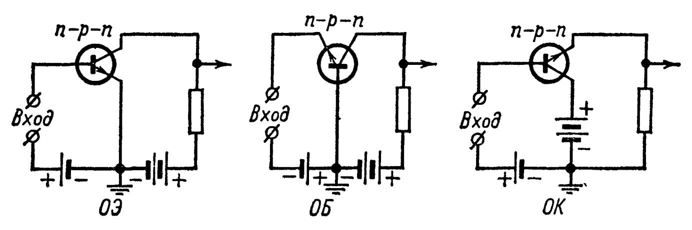


Рис. 87. Включение транзистора структуры *n-p-n* в трех основных схемах. Обратите внимание на полярность батарей.



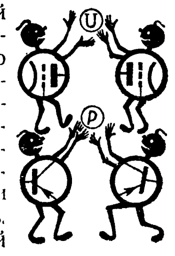
и к транзистору типа *n-p-n* — для этого нужно всего лишь поменять полярность источников питания и полярность электролитических конденсаторов в схемах.

Н. — Именно этим я и занимался, приспосабливая к транзисторам типа *n-p-n* рассмотренные нами в прошлый раз три основные схемы. И на своем ложе страданий я сделал эти рисунки (рис. 87).

Л. — Не преувеличивай! Если судить по этим схемам, а я должен признать, что они сделаны безукоризненно правильно, то грипп не сказался отрицательно на твоих умственных способностях.

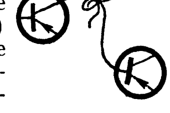
Н. — Я тоже надеюсь на это, так как горю от нетерпения перейти к изучению полных схем усилителей и приемников на транзисторах. Впрочем, я думаю, что при составлении таких схем можно пользоваться знакомыми нам из ламповых схем принципами, учитывая, конечно, невысокое входное сопротивление транзисторов.

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ РАЗНИЦА



Л. — И да, и нет, Незнайкин. Не удивляет ли тебя, мой достойный оракула, ответ? Разумеется, все цепи связи, используемые в ламповых схемах, применимы и для транзисторов. Но тем не менее между ними есть принципиальная разница: в любой ламповой схеме каждый каскад подает на следующий усиленное *напряжение*; и только оконечный каскад, управляемый чаще всего тоже напряжением, должен отдавать мощность. В отличие от этого в транзисторных схемах каждый каскад передает некоторую *мощность*, которую он усилил и которую следующий каскад в свою очередь должен усилить. Я сказал бы, что транзисторный приемник представляет собой цепочку каскадов, на которых непрерывно нарастает мощность.

Н. — Я признаю, что это существенно изменяет суть дела. В своем письме ты хорошо объяснил мне, что если хотят передать на сопротивление нагрузки максимальное напряжение, то стараются взять это сопротивление большой величины. Именно этого стремятся достичь во всех связях между лампами, и это легко удается, так как входное сопротивление лампы бесконечно велико. В транзисторных же схемах мы стремимся передать максимальную мощность. Для достижения этой цели нужно, чтобы сопротивление нагрузки имело ту же величину, что и сопротивление источника. Однако во всех трех рассмотренных нами схемах входное и выходное сопротивления имеют весьма различные значения. Отсюда я с моей железной логикой делаю вывод, что необходимо согласовывать сопротивления с помощью трансформатора. Следовательно, единственным средством связи между транзисторами может быть трансформатор.



Л. — О непоседливая молодость, ищущая абсолюта! Я сожалею, но должен тебя огорчить. В транзисторной технике связь с помощью резисторов (точнее — резистивно-емкостная) тоже имеет право на существование. Можно даже вообще обойтись без каких-либо элементов связи, соединив непосредственно выход транзистора одного со входом транзистора другого каскада.

Н. — Как? Куском простой проволоки?

ПРЕИМУЩЕСТВА И НЕДОСТАТКИ ТРАНСФОРМАТОРА

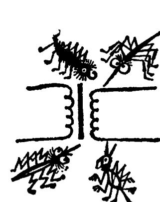
Л. — Вот именно. Однако продолжим все по порядку, и раз ты проявляешь столько симпатии к трансформатору, начнем с него. Ты назвал одно из его положительных качеств — он позволяет прекрасно согласовать выходное сопротивление каскада с входным сопротивлением следующего каскада, т. е. добиться оптимальных условий передачи мощности, но он наделен и другими добродетелями. Малое сопротивление провода его обмоток вызывает достаточно малое падение питаю-

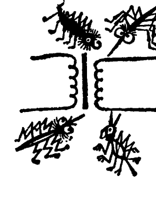
щего напряжения, и поэтому можно пользоваться источниками питания с невысоким напряжением. И, что особенно важно для высокочастотных усилителей, выбором соответствующей связи с колебательными контурами можно добиться хорошей избирательности в каскадах высокой и промежуточной частоты. При этом можно не только подобрать требуемую степень связи между двумя транзисторами, но и добиться нужной полосы пропускания частот.

Н. — Ты видишь в трансформаторе только положительные качества, и я не могу понять, почему...

Л. — Как видно, я должен показать тебе и оборотную сторону медали. Прежде всего, какого бы прогресса ни достигла миниатюризация, трансформатор занимает больше места, чем детали резистивно-емкостной схемы связи (по крайней мере на низких частотах, так как в блоках высокой и промежуточной частоты никакой вид связи не может конкурировать с трансформаторной). Кроме того, низкочастотный трансформатор оказывается дороже, чем резисторы и конденсаторы.

Н. — Одним словом, трансформатор приносят в жертву пошлым соображениям о месте и деньгах.





Л. — Фирмы, выпускающие транзисторные приемники, не филантропы, и поскольку покупатель требует все более портативных приемников, то, отказываясь от трансформаторов, они получают двойную экономию. Впрочем, применение трансформатора влечет за собой еще одну дополнительную трудность, особенно если он устанавливается на входе усилителя с большим коэффициентом усиления.

Н. — Какую же именно?

Л. — На его обмотки наводятся и затем усиливаются паразитные сигналы, которые могут стать причиной помех. Это исключает использование трансформатора там, где существуют сильные поля помех.

А ВОТ И ПРАКТИЧЕСКИЕ СХЕМЫ

Н. — Вот в скольких грехах уличен мой бедный трансформатор!.. Могу ли я все же знать, как его включают, если соображения экономии и наличие помех не исключают возможности применения трансформатора?

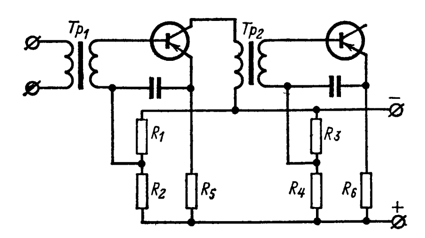


Рис. 88. Схема трансформаторной связи между двумя каскадами (транзисторы включены по схеме с ОЭ). Сигнал на первый каскад подается также через трансформатор.

Л. — Трансформаторая схема связи транзисторов не отличается от аналогичной ламповой схемы. Как ты видишь, я изобразил здесь (рис. 88) два транзистора, включенных по схеме с ОЭ. Трансформатор $Тр_1$ служит для подачи сигнала

на первый транзистор, а трансформатор $Тр_2$ используется для связи между первым и вторым транзисторами. У второго трансформатора во вторичной обмотке витков значительно меньше, чем в первичной. Если выходное сопротивление первого транзистора $R_{вых}=20\,000$ *ом*, а входное сопротивление второго $R_{вх}=250$ *ом*, то для наилучшего согласования коэффициент трансформации должен быть

$$n=\sqrt{\frac{R_{вых}}{R_{вх}}}=\sqrt{\frac{20\,000}{250}}=\sqrt{80}\approx 9.$$

Н. — Я вижу, что напряжения смещения на базы подаются от делителей напряжения R_1, R_2 и R_3, R_4, а в цепях эмиттеров ты предусмотрел резисторы R_5 и R_6, служащие для компенсации влияния температуры.

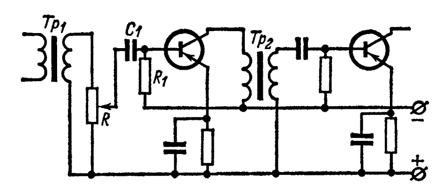


Рис. 89. Смешанная связь с помощью трансформатора, резистора и конденсатора. Потенциометр R служит для регулирования усиления (громкости).

Л. — Браво, Незнайкин! Твоя прекрасная память совершенно не пострадала от гриппа.

Н. — Рассматривая твою схему, я спрашиваю себя, как ты будешь регулировать громкость звука?

Л. — Здесь я не предусмотрел регулирования усиления. Его можно было бы осуществить с помощью регулируемой отрицательной обратной связи. Но я считаю такой метод нежелательным. Прежде всего, он не позволяет снизить усиление до нуля, чтобы достичь полной тишины. А кроме того, одновременно с изменением громкости звука изменяется коэффициент искажений, причем он достигает максимума именно при наибольшей громкости звучания.

Н. — То есть тогда, когда искажения наиболее сложно устранить. Что же ты предлагаешь в этом случае?

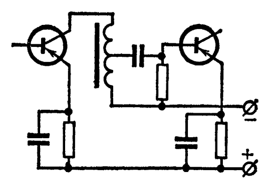
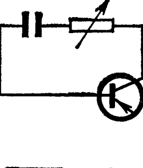
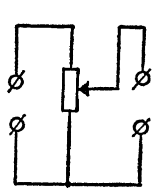


Рис. 90. Схема автотрансформаторной связи.

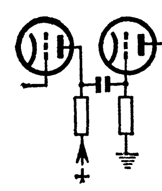


Л. — В качестве регулятора громкости можно применять потенциометр R (рис. 89), чтобы по желанию снимать бо́льшую или меньшую часть напряжения, появляющегося на вторичной обмотке первого трансформатора. Ползунок этого потенциометра через конденсатор связи C_1 соединен с базой первого транзистора. В новой схеме конденсатор применен и для связи между обоими транзисторами.



Н. — Твой второй усилитель напоминает мне кентавра: как и это мифологическое существо — получеловек-полулошадь, схемы его связи состоят наполовину из трансформаторов, наполовину из резисторов и конденсаторов.

Л. — Признаю, что в этой схеме мы теряем простоту «чистой» схемы на трансформаторах. Может быть, тебя больше



удовлетворит логически вытекающая из нее схема со связью на автотрансформаторе (рис. 90), который обычно бывает понижающим, чтобы согласовать высокое выходное сопротивление предшествующего транзистора с меньшим входным сопротивлением следующего транзистора, полагая, что оба транзистора используются по схеме с ОЭ.

Н. — Это опять наполовину рыба, наполовину мясо.

СХЕМА, СОСТОЯЩАЯ ТОЛЬКО ИЗ РЕЗИСТОРОВ И КОНДЕНСАТОРОВ

Л. — Если смешанные схемы вызывают у тебя отвращение, то перейдем к усилителю на резисторах и конденсаторах, схема которого показана вот на этом рисунке (рис. 91).

Н. — Но она как две капли воды похожа на ламповую схему с резистивно-емкостной связью! Сопротивление резистора в цепи коллектора R_1 соответствует сопротивлению в анодной цепи, а сопротивления резисторов R_2 и R_3, определяющие потенциал базы, — младшие братья сопротивления утечки сетки. Что же касается конденсатора C, то меня удивляет, что он электролитического типа. Не лучше ли здесь применить хороший бумажный конденсатор на каких-нибудь 0,05 *мкф*, который прекрасно справляется со своей задачей в ламповых усилителях?

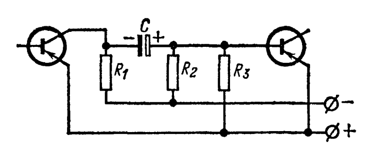


Рис. 91. Схема резистивно-емкостной связи.

Л. — Для нашего случая это было бы катастрофой. В ламповых схемах конденсатор C соединяется с резистором утечки сетки, сопротивление которого обычно составляет 0,5 *Мом*. В транзисторной же схеме суммарное сопротивление параллельно соединенных резисторов R_2 и R_3 равно примерно 1 000 *ом*, и, кроме того, они зашунтированы сопротивлением $R_{вх}$ второго транзистора. Это сопротивление невидимо, но тем не менее оно присутствует и имеет величину того же порядка, что и совокупность сопротивлений резисторов R_2 и R_3, скажем еще 1 000 *ом*.

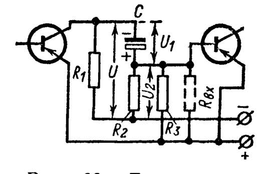
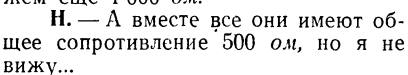
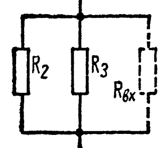


Рис. 92. Та же схема, что и на рис. 91, но изображенная так, чтобы нагляднее показать делитель напряжения, состоящий из конденсатора связи C и параллельно соединенных резисторов R_2, R_3 и $R_{вх}$.





Н. — А вместе все они имеют общее сопротивление 500 *ом*, но я не вижу...

Л. — Минуту терпения! Мы можем нарисовать нашу схему несколько иначе (рис. 92).

На этом рисунке наглядно видно, что конденсатор C вместе с резисторами R_2, R_3 и сопротивлением $R_{вх}$ образует делитель для выходного напряжения U предшествующего транзистора. Каково же его емкостное сопротивление?

Н. — Оно зависит от частоты тока и уменьшается при повышении этой частоты.

Л. — Разумеется, и если ты возьмешь конденсатор на 0,05 *мкф*, которым ты так гордишься, и включишь его в цепь тока частотой 50 *гц*, то емкостное сопротивление этого кон-

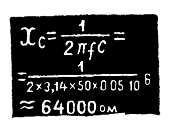
денсатора C составит около 64 000 *ом*, т. е. будет примерно в 130 раз больше параллельно соединенных сопротивлений R_2, R_3 и $R_{вх}$.

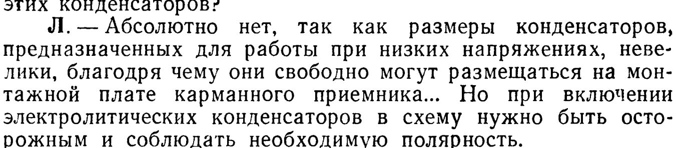
Н. — Какое бедствие! Ведь напряжения U_1 и U_2 делятся пропорционально сопротивлениям, следовательно, U_2 составит лишь $^1/_{130}$ часть напряжения U и мы передадим на второй транзистор лишь эту ничтожную частицу [1].

Л. — Вот почему для предотвращения этого глупого разбазаривания энергии полезного сигнала нужно применять конденсатор большой емкости, например электролитический конденсатор емкостью в 10 *мкф*, который, обладая на частоте 50 *гц* сопротивлением всего лишь около 300 *ом*, позволит передать больше половины напряжения. На более высоких частотах емкостное сопротивление конденсатора будет еще меньше и результат будет еще лучше. Но недостаточное емкостное сопротивление вызвало бы нежелательное ослабление низких тонов.

БУДЬТЕ ОСТОРОЖНЫ С ПОЛЯРНОСТЬЮ

Н. — Если я правильно понимаю, то в транзисторных схемах, где резисторы обычно имеют меньшее сопротивление, чем в ламповых схемах, мы часто применяем электролитические конденсаторы. Не возникает ли осложнений из-за размеров этих конденсаторов?

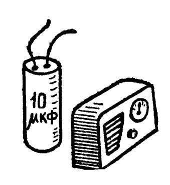




Л. — Абсолютно нет, так как размеры конденсаторов, предназначенных для работы при низких напряжениях, невелики, благодря чему они свободно могут размещаться на монтажной плате карманного приемника... Но при включении электролитических конденсаторов в схему нужно быть осторожным и соблюдать необходимую полярность.

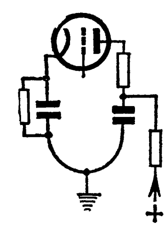
Н. — Я вижу, что ты соединил отрицательный вывод конденсатора с коллектором, который должен иметь потенциал, более отрицательный, чем база. Предполагаю, что в случае применения транзистора типа *n-p-n* ты поступил бы наоборот.

Л. — И ты не ошибся. Чтобы показать тебе полярность электролитических конденсаторов в различных местах схемы, я предлагаю тебе внимательно рассмотреть схему микрофонного усилителя (рис. 93). Ты видишь, что регулировка громкости здесь осуществляется на входе первого транзистора с помощью потенциометра R.



Н. — С потенциометра сигнал подается на базу через конденсатор C_1, который на этот раз соединен с базой своим отрицательным выводом. С конденсатором связи C_2 поступили наоборот — его отрицательный вывод соединен с коллектором (потенциал которого еще более отрицательный, чем у базы), а положительным выводом он обращен к базе... Я констатирую, что оба транзистора снабжены резисторами R_3 и R_7, предназначенными для температурной стабилизации; блокирующие их конденсаторы C_3 и C_4, разумеется, соединены своими положительными выводами с... положительным полюсом источника питания. Но для чего служит резистор R_5, который ты соединил последовательно с резистором R_4 в цепи коллектора первого транзистора? Он, как я вижу, заблокирован электролити-

[1] Более глубокий анализ, учитывающий, в частности, выходное сопротивление первого транзистора, показал бы, что положение не столько катастрофично. Однако приведенные здесь рассуждения в первом приближении остаются в силе.



ческим конденсатором C_6, у которого положительный вывод также соединен с положительным полюсом батареи.

Л. — Разве ты не узнаешь в нем своего старого знакомого, часто применяемого в схемах на лампах?..

Н. — Черт возьми! Так это наша старая развязка анодной цепи... Прости, здесь она находится в цепи коллектора. Служит ли она также для предотвращения паразитной связи через общее сопротивление источника питания, способной вызвать самовозбуждение?

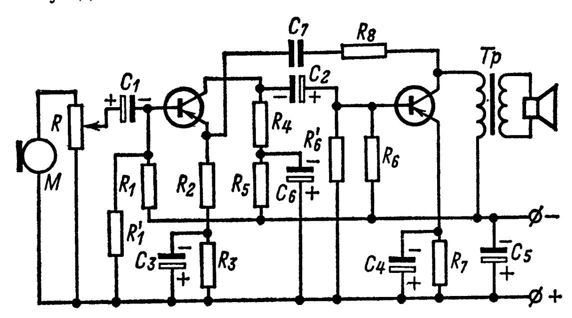
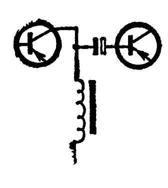


Рис. 93. Полная принципиальная схема микрофонного усилителя. Из всех конденсаторов только конденсатор C_7 не электролитический (его емкость порядка 0,05 *мкф*).

Л. — Совершенно верно, внутреннее сопротивление источника питания может создать опасную связь. Поэтому, чтобы предоставить переменным составляющим тока легкий путь помимо источника питания, в транзисторных схемах тоже часто применяют развязки. Полезно также подключить к зажимам батареи конденсатор C_5 достаточной емкости.

Н. — В этой схеме, чтобы создать своего рода полную коллекцию всех усовершенствований, ты применил еще комбинированную обратную связь, где часть выходного напряжения через резистор R_8 и конденсатор C_7 поступает на резистор R_2 включенный в цепь эмиттера первого транзистора. Это то самое устройство, что мы изучали на рис. 62.

ПРЯМОЙ ПУТЬ

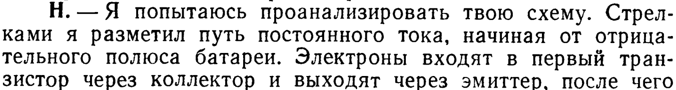


Л. — Несмотря на позднее время, твоя память, Незнайкин, остается свежей, поэтому я еще расскажу о связи с помощью сопротивлений иного вида. Вместо омического сопротивления в цепь коллектора можно также включать дроссель, больший по габаритам и более дорогой, но зато с малым сопротивлением постоянному току. А чтобы компенсировать твое терпение, я покажу тебе первую схему с непосредственной связью (рис. 94). Как ты видишь, здесь первый транзистор включен по схеме с ОК и его выходной электрод-эмиттер соединен непосредственно с базой второго транзистора, включенного по схеме с ОЭ.

Н. — Я должен признать, что это очень экономичная схема. Но я спрашиваю себя, как можно с такой легкостью выкинуть конденсатор связи?

Л. — В схемах на лампах это можно было бы сделать только ценою больших усложнений, потому что анод должен иметь высокий положительный потенциал, тогда как на сетке

следующей лампы должно быть отрицательное смещение. В транзисторных же схемах все устраивается значительно проще. Разница потенциалов невелика, и потенциалы базы и коллектора должны иметь по отношению к эмиттеру тот же знак, тогда как у ламп сетка должна быть отрицательной, а анод — положительным. Поэтому в схемах на транзисторах можно без труда сообщить каждому электроду необходимый потенциал, создавая соответствующее падение напряжения на подобранных для этого резисторах.



Н. — Я попытаюсь проанализировать твою схему. Стрелками я разметил путь постоянного тока, начиная от отрицательного полюса батареи. Электроны входят в первый транзистор через коллектор и выходят через эмиттер, после чего ток делится на две части. Одна часть электронов проходит через резистор R_1, в результате чего вывод этого резистора, соединенный с базой второго транзистора, становится отрицательным по отношению к положительному полюсу источника тока. Другие электроны поступают в базу второго транзистора и идут к его эмиттеру. Это просто-напросто средний ток базы... Действительно, ты прав: в первом транзисторе эмиттер положителен по отношению к коллектору, а во втором — база отрицательна по отношению к эмиттеру. Итак, все в порядке, на этой схеме мы сэкономили один электролитический конденсатор и один резистор.

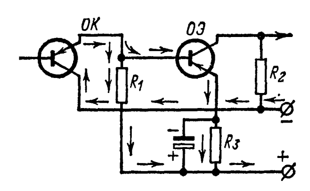
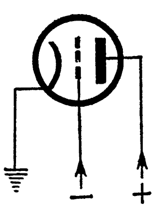


Рис. 94. Схема с непосредственной связью. Стрелками обозначено направление электронного тока, создающего на резисторе R_1 падение напряжения необходимой полярности.

Л. — Да..., но этим не ограничиваются преимущества непосредственной связи. Вспомни, что конденсатор никогда не передает одинаково все частоты. Даже при большой емкости нельзя передать очень медленные изменения напряжения. Здесь же мы осуществили настоящий у с и л и т е л ь п о с т о я н н о г о т о к а.



Н. — Постой, Любознайкин! Как можно говорить об усилении чего-нибудь постоянного?

Л. — Я признаю, что термин избран не очень удачно, но так называют усилители, предназначенные для сигналов очень низких частот, например, частот в несколько герц или даже таких частот, у которых период длится несколько секунд. Кроме того, можно усиливать медленно изменяющиеся непериодические напряжения и токи. Именно с такими сигналами мы сталкиваемся в биологии. В таких случаях только усилители постоянного тока и можно применять.



Н. — Я вижу еще один случай, где такие усилители были бы очень полезны: это усиление телевизионных видеосигналов, где очень важно сохранить постоянную составляющую, которой конденсатор связи закрывает путь.

ПЕРВОЕ ПРИМЕНЕНИЕ СИММЕТРИИ

Л. — Представь себе, Незнайкин, что об этом подумали до тебя. И чтобы уменьшить твое огорчение, которое ты, несомненно, испытываешь, еще раз убедившись, что у тебя воруют идеи..., прежде чем они рождаются, я предлагаю твоему

вниманию другую схему с непосредственной связью, где оба транзистора включены по схеме с ОЭ. Но они должны быть для этого противоположны по структуре: один *n-p-n*, а другой *p-n-p*. Подобные комбинации обычно называют схемами с дополнительной симметрией (рис. 95).



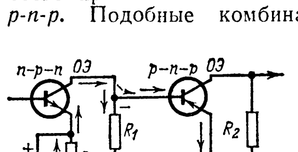
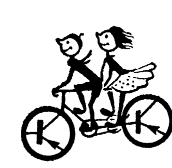


Рис. 95. Другая возможность осуществления непосредственной связи — применение транзистора с дополнительной симметрией.



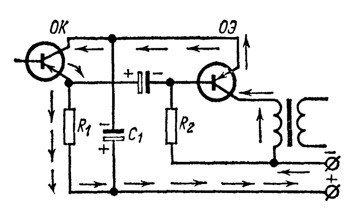
Н. — Проследив по стрелкам путь электронов, я без труда установил, что здесь тоже все происходит наилучшим образом. Коллектор первого транзистора положителен по отношению к своему эмиттеру, как это должно быть в транзисторе типа *n-p-n*. А во втором транзисторе (типа *p-n-p*) база имеет отрицательный по отношению к эмиттеру потенциал. Чего еще желать?.. Нет ли возможности освободиться от твоих стабилизирующих резисторов R_3 и R_4 с их конденсаторами, чтобы добиться еще большей экономии?

Л. — Если нет необходимости поддерживать неизменной абсолютную величину постоянной составляющей, то можно обойтись без этих деталей, но тогда ты лишаешь себя системы температурной стабилизации рабочих точек.

Н. — Досадно, так как я не скрываю от тебя, какую симпатию вызывают у меня эти схемы.

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫЙ ТАНДЕМ

Л. — Заметь, мой друг, что существуют другие схемы с прямой связью, значительно менее подверженные влиянию изменений температуры, например схема с транзисторами, расположенными тандемом в каскаде предварительного усилителя и в оконечном каскаде.



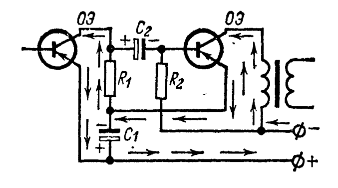


Рис. 96. Тандем из двух последовательно питаемых транзисторов. Стрелками, как и раньше, указано направление электронного тока.

Рис. 97. Другой тандем, состоящий из двух транзисторов, включенных по схеме с ОЭ и питаемых последовательно.

Н. — Что дает нам эта история с велосипедом?

Л. — Тандемами называют пары транзисторов с последовательным питанием: постоянная составляющая поочередно проходит по обоим транзисторам, что и определяет прекрасную стабильность. Вот схема (рис. 96), где первый транзистор включен с ОК, а второй с ОЭ. Понимаешь ли ты, как работает эта схема?

Н. — Еще раз последуем за проводником, я хотел сказать, проследим по стрелкам. Это напоминает мне время, когда я, будучи бойскаутом, участвовал в играх, где нужно было идти по дороге, размеченной стрелками... Начнем свой путь как обычно с отрицательного полюса источника питания. Пройдя первичную обмотку выходного трансформатора, наши отважные электроны входят во второй транзистор через коллектор и выходят через эмиттер, чтобы устремиться затем в коллектор первого транзистора, откуда они выходят через эмиттер. После этого блестящего подвига им остается только пройти через сопротивление нагрузки, чтобы вернуться в отчий дом, я хотел сказать — на положительный полюс источника питания.

Л. — Как ты заметил, один и тот же ток поочередно проходит по обоим транзисторам: коллектор первого транзистора непосредственно соединен с эмиттером второго, а их общая точка блокирована конденсатором C_1, чтобы устранить взаимное влияние переменных составляющих токов разных каскадов.

Н. — Я признаю, что схема весьма оригинальна. А можно ли применить этот же принцип к двум транзисторам, включенным по схеме с ОЭ?

Л. — Разумеется. Такой тандем (рис. 97) даст большее усиление, чем рассмотренный только что. Проследи обозначенный стрелками путь. Ты и здесь обнаружишь, что один и тот же ток поочередно проходит по обоим транзисторам. Для постоянной составляющей они соединены последовательно, а для усиливаемых сигналов имеется самый классический вид связи — с помощью резисторов и конденсатора.

Н. — Эти хитроумные схемы напоминают мне упражнения в вольтижировке на лошади и вызывают у меня головокружение.

Л. — В таком случае я рекомендую тебе отдохнуть. Доброй ночи!



БЕСЕДА ОДИННАДЦАТАЯ

ЭКОНОМИЯ И МОЩНОСТЬ

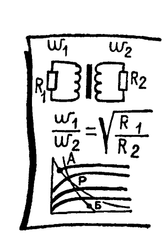
Рассматривая различные виды межкаскадной связи, наши друзья сосредоточили свое внимание на усилении низкой частоты. Они изучили различные схемы, но проблема выходного каскада осталась неосвещенной. Однако когда нужно создавать значительную мощность, прибегают к особым схемам и режимам работы, которые являются предметом настоящей беседы.

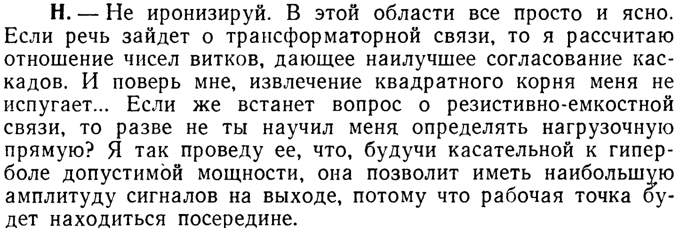
Содержание: Выбор рабочей точки. Экономическая схема с плавающей рабочей точкой. Двухтактный усилитель в режиме В. Поворот фазы с помощью трансформатора. Фазоинвертор. Катодный повторитель на транзисторах. Двухтактный усилитель с дополнительной симметрией. Практическая схема выходного каскада.

НЕЗНАЙКИН ПРОЯВЛЯЕТ ЗАЗНАЙСТВО

Незнайкин. — Я полагаю, что с полученными мною знаниями в области низких частот смогу теперь рассчитать все элементы усилителей на транзисторах.

Любознайкин. — Я всегда восхищался твоей скромностью...





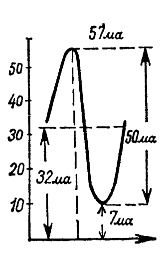
Н. — Не иронизируй. В этой области все просто и ясно. Если речь зайдет о трансформаторной связи, то я рассчитаю отношение чисел витков, дающее наилучшее согласование каскадов. И поверь мне, извлечение квадратного корня меня не испугает... Если же встанет вопрос о резистивно-емкостной связи, то разве не ты научил меня определять нагрузочную прямую? Я так проведу ее, что, будучи касательной к гиперболе допустимой мощности, она позволит иметь наибольшую амплитуду сигналов на выходе, потому что рабочая точка будет находиться посередине.

Л. — Рискуя тебя огорчить, я должен сказать, что дело обстоит не так уж просто. На первый взгляд ты прав, но при расчете усилителей нужно также учитывать и имеющуюся на входе мощность, полосу усиливаемых частот, роль обратной связи, допустимый коэффициент искажений и еще массу других обстоятельств.

Н. — Довольно забрасывать меня этими требованиями. Я признаюсь, что согрешил от избытка наивной гордости. И тем не менее дело выглядит достаточно просто, когда прибегают к помощи семейства характеристик и нагрузочной прямой (рис. 98). Наш входной сигнал (сигналом можно считать как напряжение, так и ток) имеет право занимать часть нагрузочной прямой, ограниченную двумя точками: с одной стороны точкой *А*, где начинается изгиб характеристик, а с другой — точкой *Б*, в которой ток базы приближается к нулю.

Л. — Что, как ты знаешь, является причиной нелинейных искажений.

Н. — Бесспорно. Поэтому рабочую точку P нужно выбрать на равном удалении от точек A и $Б$. В этом случае максимальная амплитуда входного сигнала будет PA или $PБ$ или, вернее, разница между соответствующими значениями тока $I_б$ или



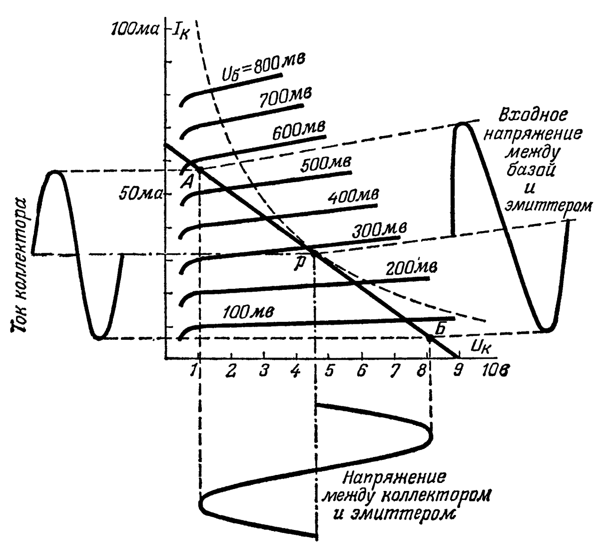


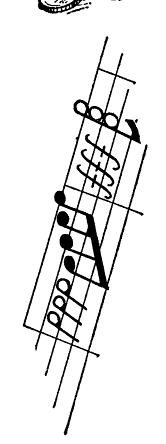
Рис. 98. На графике видно, как ток коллектора изменяется под воздействием приложенного на вход сигнала. Последний имеет максимально допустимую амплитуду.

напряжения $U_б$. На моем рисунке эта амплитуда имеет величину порядка 275 *мв*. Она изменяет ток коллектора от 7 до 57 *ма* при среднем значении тока 32 *ма*, т. е. с амплитудой 25 *ма*.

Л. — Чудесно, Незнайкин. Надеюсь, что ты полностью удовлетворен работой своего транзистора.

ДОЛОЙ РАСТОЧИТЕЛЬСТВО

Н. — Не совсем. Насколько все идет хорошо при большом сигнале, настолько же я прихожу в отчаяние от непомерного расхода энергии при слабых сигналах или в отсутствие усиливаемого сигнала. Какова бы ни была амплитуда, потребление тока всегда одинаково — оно соответствует точке P. А ведь для слабых сигналов рабочую точку можно было переместить ниже на другую нагрузочную прямую, соответствующую меньшим токам, например в точку P' (рис. 99). В результате потребление энергии сократилось бы и мы сэкономили бы на батареях, которые обходятся достаточно дорого.



Л. — Ты хочешь разорить выпускающие их фирмы?

Н. — Нет, но я считаю, что, слушая симфонию, нерационально затрачивать во время пианиссимо такую же мощность, какую требуют моменты игры всего оркестра. Однако я не вижу, каким способом можно было бы заставить рабочую точку перемещаться на нижнюю нагрузочную прямую, чтобы затрачивать только мощность, строго необходимую для воспроизведения без искажений сигналов разной величины.

Л. — Стремление избежать расточительства похвально. Поэтому я охотно укажу тебе соответствующие средства.

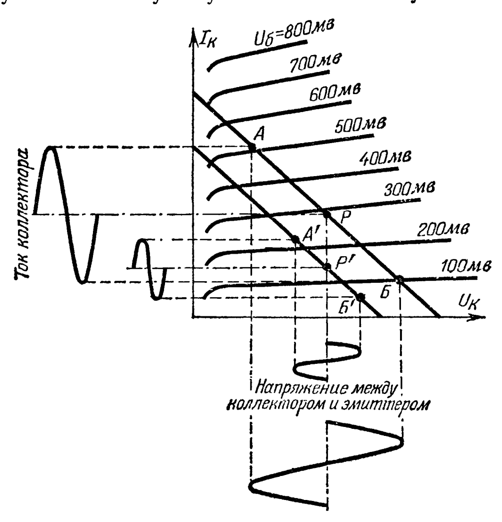


Рис. 99. Когда амплитуда сигнала снижается, выгоднее переместить рабочую точку из P в P'.

Чтобы твоя рабочая точка могла переходить с одной нагрузочной прямой на другую, надо изменять напряжение смещения[1]. Оно должно повышаться с амплитудой сигнала, и это должен делать сам сигнал.

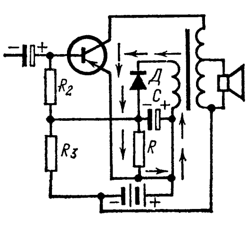
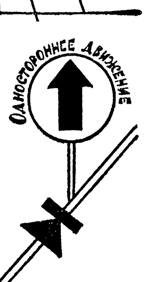


Рис. 100. Выходной каскад с плавающей точкой смещения. Цепь автоматической регулировки смещения при увеличении амплитуды сигналов позволяет повысить напряжение смещения.



Н. — Как? Ведь сигнал это переменный ток, а смещение — постоянный.

Л. — Ты знаешь превосходное средство для превращения переменного тока в постоянный: это выпрямитель. Именно его и применяют, чтобы получить переменное смещение.

Вот практическая схема усилителя с «плавающей» рабочей точкой (рис. 100). Ты видишь, что усиленные сигналы, снимаемые с дополнительной обмотки выходного трансформатора, выпрямляются с помощью полупроводникового диода D; они создают на выводах резистора R падение напряжения, которое делает точку X более или менее отрицательной. Конденсатор C сглаживает пульсации выпрямленного напряжения, так что его величина соответствует среднему значению усиливаемого сигнала.

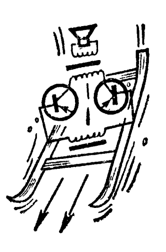
[1] Изменяя смещение, мы сдвигаем нагрузочную прямую параллельно ей самой. Она сохраняет свой наклон, соответствующий данному сопротивлению нагрузки. Сопротивление коллекторной цепи постоянному току мало (это сопротивление провода первичной обмотки выходного трансформатора), так что среднее напряжение $U_к$ на коллекторе не зависит от смещения. Таким образом, рабочая точка может переместиться из точки P в точку P', скользя по вертикальной линии.

Н. — Да, это напоминает мне схему АРУ. Там мы тоже встречали конденсатор, который вместе с резистором придавал схеме АРУ инерционность подобно маховику-регулятору.

Л. — Сравнение весьма удачное, хотя наше устройство напоминает не столько обычную АРУ, сколько АРУ, работающую «наизнанку». Здесь тоже амплитудные изменения усиленных напряжений выпрямляются, после чего используются для управления смещением на входе. Действительно, напряжение точки X прикладывается к общей точке резисторов R_2 и R_3, которые соединяют базу с отрицательным полюсом источника питания. Правильный выбор сопротивлений трех резисторов позволяет сделать смещение пропорциональным амплитуде сигналов. Таким образом, база становится здесь тем более отрицательной, чем сильнее сигналы. Но в отличие от знакомой тебе АРУ в ламповых приемниках, увеличение отрицательного смещения в цепи базы транзистора структуры *p-n-p* не запирает его, а еще более открывает, увеличивая токи базы и коллектора.

ДА ЗДРАВСТВУЕТ РЕЖИМ В!

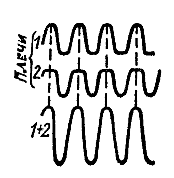
Н. — Твоя схема с плавающей точкой смещения мне очень нравится. Когда я буду собирать свой приемник на транзисторах, то непременно поставлю на выходе прекрасный двухтактный каскад с этим устройством, дающим скользящее напряжение смещения.



Л. — В двухтактной схеме, мой дорогой Незнайкин, можно сделать лучше: ты можешь приложить там постоянное смещение, достаточно малое, чтобы в состоянии покоя ток был почти равен нулю.

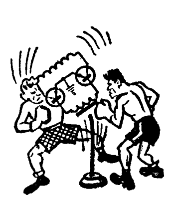
Н. — Не хочешь ли ты этим сказать об усилении в режиме В? В ламповых схемах это соответствует работе на нижнем изгибе анодно-сеточной характеристики.

Л. — Да, как раз о режиме *B* я и хотел поговорить с тобой. Ты должен выбрать для точки *P* место, соответствующее очень небольшому, но не нулевому значению коллекторного тока, так как если ты уйдешь слишком далеко, слабые сигналы окажутся на нелинейной части характеристики (рис. 101).



Н. — Я вижу, что здесь полупериоды, которые повышают напряжение базы, вызывают значительное увеличение коллекторного тока, тогда как полупериоды с обратным направлением лишь незначительно изменяют его величину. В результате мы имеем чудовищные искажения.

Л. — Они не позволили бы применять один транзистор в режиме В. Но если ты поставишь два транзистора по двухтактной схеме, то равномерно распределишь между ними работу: один возьмет на себя положительные полупериоды, а другой отрицательные. Благодаря симметричности схемы искажения, вносимые каждым транзистором, нейтрализуются искажениями другого транзистора.



Н. — Одним словом, такой усилитель в режиме В напоминает «грушу», которую два боксера одновременно используют для тренировки: стоя по обе стороны, они наносят по ней удары, которые поочередно отклоняют ее то вправо, то влево.

Л. — Все это верно, и вдвоем они сильнее раскачают ее, чем это мог бы сделать один боксер.

Н. — Действительно, рабочая точка находится ближе к одному концу нагрузочной прямой, и для входного сигнала мы располагаем пространством вдвое большим, чем в режиме А,

где рабочая точка находится на середине нагрузочной прямой.

Л. — Как ты видишь, режим В допускает амплитуды вдвое бо́льшие, чем режим А. Расход тока, очень небольшой в отсутствие сигнала, возрастает пропорционально амплитуде сигналов. И я еще не сказал тебе, что режим В позволяет свободно превысить ограничения, наложенные гиперболой допустимой мощности.

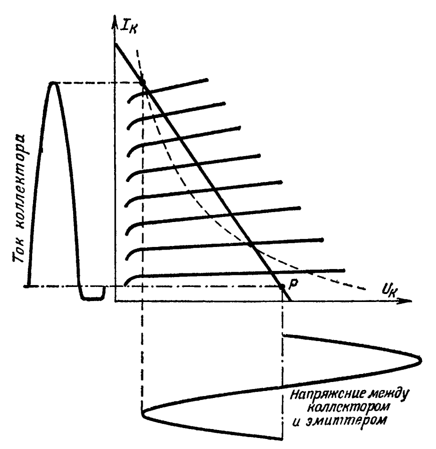
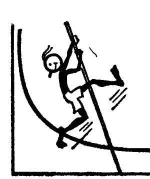


Рис. 101. В режиме В рабочая точка переносится ближе к нижнему концу нагрузочной прямой, что позволяет прилагать сигналы с амплитудой, вдвое большей, чем в режиме А. Форма коллекторного тока, как это показано, сильно искажена.

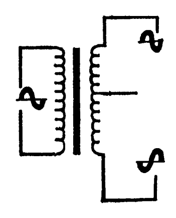


Н. — Хочешь ли ты этим сказать, что нагрузочная прямая может пройти за пределами этой кривой?

Л. — Совершенно правильно, и без опасности для транзистора, так как рассеиваемая им мощность лишь в отдельные моменты будет превышать эту границу. Зато во время положительных полупериодов сигнала транзистор попросту запирается и практически не рассеивает никакой мощности. Однако здесь следует учитывать другую характеристику, указанную в справочниках по транзисторам: не превышать допустимое пиковое значение коллекторного тока ($I_{к.макс}$).

Н. — Я обещаю тебе никогда не превышать этой величины. Получив такое заверение, ты, не опасаясь, можешь посвятить меня во все тайны двухтактной схемы на транзисторах.

ЦАРСТВО СИММЕТРИИ



Л. — Прежде всего запомни, Незнайкин, что схемы, которые мы сейчас разберем, применяются как в режиме В, так и в режиме А. Различие состоит лишь в величине смещения. Чаще всего применяется схема с ОЭ, дающая наибольшее усиление. Однако когда хотят максимально снизить искажения, то отдают предпочтение схеме с ОБ. И, наконец, если входное сопротивление должно быть высоким, а выходное малым...

Н. — ...применяют схему с ОК. Я не сомневался в этом. Что же касается поворота фазы, то я полагаю, что его легко

достигают при помощи трансформатора с выводом от средней точки вторичной обмотки. Точно так же вывод от середины первичной обмотки выходного трансформатора позволит объединить выходные сигналы обоих транзисторов.

Л. — Правильно, а вот изображение двух схем: первая с ОЭ (рис. 102), а вторая с ОБ (рис. 103). Ты должен оценить исключительную симметрию этих схем.

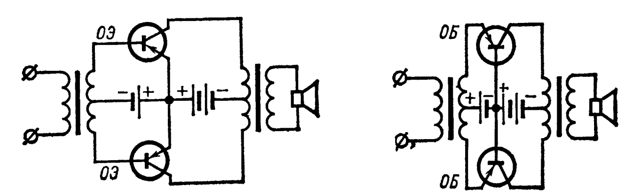
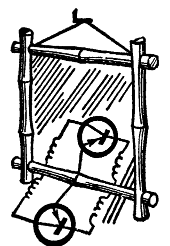


Рис. 102. Двухтактная схема с трансформатором в качестве фазоинвертора. Транзисторы включены по схеме с ОЭ.

Рис. 103. Как и на предыдущем рисунке, фазоинвертором служит трансформатор. Транзисторы здесь включены по схеме с ОБ.



Н. — Необходимо ли применять, как это ты нарисовал, специальные батареи для смещения?

Л. — Нет, смещение осуществляется классическими методами: с помощью последовательно включенного резистора или делителя напряжения, подключенного к общей батарее. Я не изобразил этих цепей (которые ты теперь уже хорошо знаешь), чтобы не нарушать ясности рисунка.

ТЫСЯЧА И ОДИН ФАЗОИНВЕРТОР

Н. — В усилителях на лампах удается получить напряжения противоположных фаз для двухтактных схем и без дорогостоящего и громоздкого трансформатора. Я думаю, что это возможно и в схемах на транзисторах.

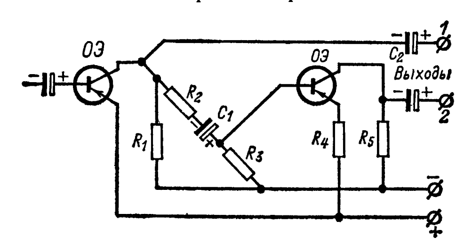


Рис. 104. Поворот фазы с помощью транзистора, включенного по схеме с ОЭ; усиление дополнительного каскада уменьшено до единицы за счет делителя напряжения, состоящего из резисторов R_2 и R_3, и за счет резистора обратной связи R_4.

Л. — Естественно. Ты знаешь, что в схеме с ОЭ выходное напряжение находится в противофазе с входным. Следовательно, можно поставить два последовательных каскада с ОЭ, и их выходные напряжения будут в противофазе (рис. 104).

Н. — Ну и странная же твоя схема!.. Связь между двумя транзисторами имеет здесь совершенно непривычный вид.

Л. — Резисторы R_2 и R_3, соединенные последовательно с конденсатором связи C_1, представляют собой делитель напряжения, который должен передавать на второй транзистор только часть напряжения, создаваемого первым транзистором на резисторе R_1. Кроме того, ты видишь, что в цепи эмиттера второго транзистора имеется резистор обратной связи R_4.

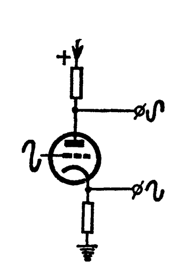
Н. — Несчастный транзистор! Ты двумя способами снижаешь его усиление.

Л. — Это как раз то, что нужно: для того чтобы оба выходных напряжения были одинаковыми, усиление второго транзистора должно равняться единице, т. е. он не должен ни усиливать, ни ослаблять.

Н. — Значит, его роль строго ограничивается поворотом фазы.

Рис. 105. Фазоинвертор по схеме с разделенной нагрузкой.

Л. — Действительно, это все, что от него требуется... Имеется и другой способ получить два противофазных напряжения с помощью только одного транзистора, включая последний по смешанной схеме с ОЭ и ОК с двумя нагрузочными сопротивлениями (рис. 105). Сигнал на выходе *1* находится здесь в противофазе, а сигнал на выходе *2* совпадает по фазе с сигналом на входе.



Н. — Но это точное воспроизведение лампового фазоинвертора, в котором сопротивления нагрузки включаются в анодную и катодную цепи.

Л. — Ты узнал эту схему в ее «транзисторном» виде.

Н. — Все показанные тобой схемы для меня старые знакомые, ведь я хорошо помню их ламповые варианты.

ЧУДЕСНАЯ ДВУХТАКТНАЯ СХЕМА

Л. — Однако на лампах нельзя осуществить двухтактную схему без фазоинвертора.

Н. — Мне не верится, что такое чудо можно сделать с транзисторами.

Л. — Тем не менее это факт, а чудо и в этом случае заключается в дополнительной симметрии транзисторов структур *p-n-p* и *n-p-n*. Проанализируй внимательно схему, где я изобразил два транзистора, включенные по схеме с ОЭ (рис. 106).



Н. — Поступим, как обычно... Допустим, что первый полупериод входного сигнала делает обе базы более отрицательными. В этом случае транзистор структуры *p-n-p* усилит сигнал, а транзистор структуры *n-p-n* останется запертым. При следующем полупериоде, который сделает базы более положительными, транзистор *p-n-p* останется безучастным, а транзистор *n-p-n* пропустит коллекторный ток. Чудесно! Ловко! Умно!

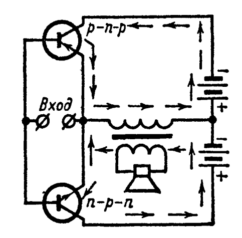


Рис. 106. Двухтактная схема без фазоинвертора, работающая на транзисторах с дополнительной симметрией, включенных по схеме с ОЭ.

Л. — Умерь свой энтузиазм, дорогой друг. Эта схема требует применения двух батарей (или по крайней мере ба-

тареи со средним выводом), что несколько усложняет положение вещей. С этим же мы сталкиваемся и в аналогичном двухтактном каскаде при включении транзисторов по схеме с ОБ (рис. 107).

Н. — Действительно, эта схема должна работать так же хорошо, как и предшествующая. Здесь транзистор структуры *p-n-p* реагирует на положительные полупериоды сигнала, приложенного к его эмиттеру, а транзистор структуры *n-p-n* включается в работу при отрицательных полупериодах. Но я опасаюсь, что эти две батареи не очень удобно применять для питания других транзисторов, которые могут иметься в схеме.

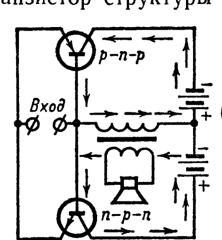




Рис. 107. Еще одна двухтактная схема без фазоинвертора, но с включением транзисторов по схеме с ОБ.

А теперь я хочу просить тебя об одном одолжении. Я хотел бы собрать усилитель на транзисторах для своего портативного радиограммофона. Мог бы ты начертить мне практическую схему его оконечного каскада? Я хочу иметь достаточно мощный двухтактный усилитель, чтобы могли танцевать все наши друзья.

Л. — Вот схема, которую ты просишь, Незнайкин (рис. 108). Достаточно ли она ясна для тебя?

Н. — Боже мой, на первый взгляд она совершенно классическая. Входной трансформатор... Параллельная обратная связь для каждого транзистора, осуществленная включением между коллектором и базой последовательно соединенных цепочек R_1C_1 и R_2C_2. Смещение задается делителем напряжения R_3R_4. Резистор R_5 служит для ослабления влияния температуры; он блокирован конденсатором C_3... Все это стало для

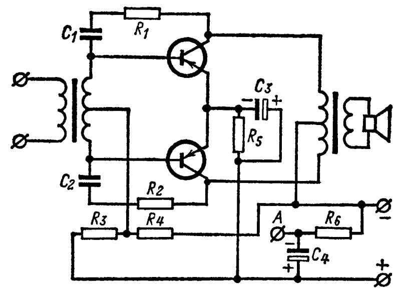
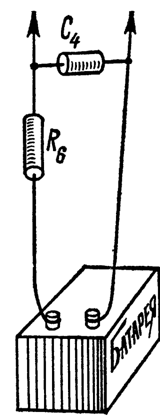


Рис. 108. Практическая схема двухтактного каскада с отрицательной обратной связью и температурной стабилизацией. Резистор R_6 и конденсатор C_4 образуют развязку цепей питания предшествующих каскадов.

меня уже совершенно обыденным. Однако какую роль играет в схеме развязка, состоящая из резистора R_6 и конденсатора C_4?



Л. — Принимая во внимание значительные изменения тока, отбираемого от источника питания мощными транзисторами в режиме В, целесообразно развязать этот источник, чтобы предотвратить реакцию на предыдущие каскады. Такова роль R_6 и C_4, к которым в точке *А* присоединяются коллекторные цепи каскадов, предшествующих выходному. Удовлетворен ли ты моим ответом?

Н. — Вполне, и я спешу приняться за работу. Поэтому позволь мне раскланяться с тобой.

◎

БЕСЕДА ДВЕНАДЦАТАЯ

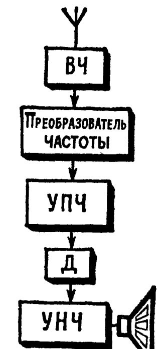
ОБЛАСТЬ ВЫСОКИХ ЧАСТОТ

Подробный анализ усиления колебаний звуковой частоты, который явился предметом предшествующих бесед, значительно облегчил задачу Любознайкина. Теперь он объяснит Незнайкину методы усиления колебаний высокой частоты. Он покажет, чем соответствующие транзисторные схемы похожи на ламповые и чем отличаются от них. В заключение он рассмотрит устройство автоматической регулировки усиления, используемое в усилителях промежуточной частоты на транзисторах.

Содержание: Граничная частота. Межкаскадная связь с помощью колебательных контуров. Затухание. Каскады высокой и промежуточной частоты. Емкость коллектор—база. Схема нейтрализации. Автоматическая регулировка усиления. Изменения внутренних емкостей и сопротивлений транзистора. Усиленная автоматическая регулировка усиления.

ЖЕРТВА ОБСТОЯТЕЛЬСТВ

Незнайкин. — Ты, очевидно, видишь, Любознайкин, что я одновременно горд и очарован; горд тем, что успешно собрал первую свою схему на транзисторах, и очарован тем, что в моем чемодане с радиограммофоном имеется этот миниатюрный усилитель, который при более чем скромном аппетите дает громкое и чистое звучание.



Любознайкин. — Я очень счастлив видеть, как успешно применил ты на практике знания, которые я сумел тебе внушить. Вот ты и удовлетворен нашими занятиями.

Н. — По правде говоря, не совсем, так как я хотел бы использовать свой усилитель не только со звукоснимателем, но также и в качестве низкочастотной части радиоприемника. Однако я не знаю, как сделать каскады, предшествующие усилителю низкой частоты.

Л. — Ну вот, познакомив тебя с усилителями низкой частоты, я стал жертвой обстоятельств и теперь должен рассказать тебе о каскадах высокой и промежуточной частоты, а также, разумеется, о преобразовании частоты и детектировании, потому что приемник на транзисторах практически имеет ту же «анатомию», что и приемник на лампах. Так начнем с усиления по высокой частоте.

ТРАНЗИСТОРЫ НА ВЫСОКИХ ЧАСТОТАХ

Н. — Я знаю, что это слабое место транзисторов, потому что, как ты мне сказал, их усиление снижается при повышении частоты.

Л. — Правда, в справочных данных по транзисторам указывают величину граничной частоты. Это частота, при которой усиление по току падает до 70% своего значения на низкой частоте. Но это не мешает в ряде случаев использовать эти транзисторы на частотах, значительно более высоких, сми-

ряясь с известным снижением усиления. Благодаря прогрессу технологии предельная рабочая частота транзисторов непрерывно повышается. И в наши дни усиление токов с частотой в несколько сотен мегагерц, соответствующих метровым и дециметровым волнам, применяемым для телевидения и радиовещания с частотной модуляцией, не представляет больше проблемы.

Н. — В чем же тогда заключается трудность? Я полагаю, что остается принять для транзисторов те же самые схемы, которые используются для ламп.

Л. — Этого нельзя было бы сделать, не принимая во внимание относительно небольших значений выходного и особенно входного сопротивлений транзисторов.

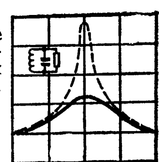
Н. — А что, разве они создают здесь бо́льшие трудности, чем на низких частотах? Я предполагаю, что достаточно применить в цепях связи понижающие трансформаторы с соответствующим коэффициентом, чтобы осуществить согласование сопротивлений, как мы это делали в области низких частот.

ДВОЙНАЯ ЦЕЛЬ

Л. — Ты забываешь, Незнайкин, что при усилении по высокой частоте надо не только усилить слабые сигналы, полученные антенной, но и произвести отбор сигналов, так сказать, отсортировать хорошее зерно от семян сорняков. Иначе говоря, перед каскадами как высокой частоты, так и промежуточной стоят две задачи: усиление и избирательность. Транзисторы принимают на себя задачу усиления...

Н. — ...а настроенные контуры, которые образуют связывающие звенья, обеспечивают избирательность.

Рис. 109. Колебательные контуры на входе и выходе каскада высокой частоты на транзисторе.

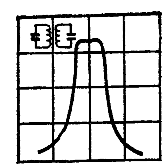


Л. — Именно это я и хотел тебе сказать. Но возьми каскад, где на входе и на выходе имеется по настроенному контуру (рис. 109). Контур на входе включен между базой и эмиттером, т. е. параллельно входному сопротивлению, имеющему 200—2 000 *ом*. Это сопротивление шунтирует контур и значительно увеличивает его затухание, из-за чего резонансная характеристика становится более тупой. Менее катастрофически обстоит дело с выходным контуром, включенным параллельно сопротивлению коллектор-эмиттер, имеющему несколько десятков килоом. Но и в этом случае затухание возрастает.

Н. — Как же тогда согласовать сопротивления и избежать при этом чрезмерного шунтирования контуров? Это история о козе и капусте...

Л. — Примирить их удается путем соответствующего выбора отношения индуктивности к емкости и неполной связью контура с транзисторами, для чего на входе и выходе включают не всю обмотку, а только часть ее витков. Это должно снизить вносимое затухание. И, разумеется, стараются согласовать сопротивления путем подбора необходимого соотношения чисел витков в обмотках трансформатора.

Н. — Значит, связь всегда должна устанавливаться с помощью трансформатора.



Л. — Не обязательно. Зачастую применяют простую схему с параллельным колебательным контуром в цепи коллектора. Это своеобразная разновидность резистивно-емкостной связи (рис. 110). Но лучше прибегнуть к помощи автотрансформатора с настроенной обмоткой, которая при помощи отводов соединяется с выходом предшествующего транзистора и со входом следующего (рис. 111 и 112). Максимальную же избирательность и наилучшее воспроизведение звука можно полу-

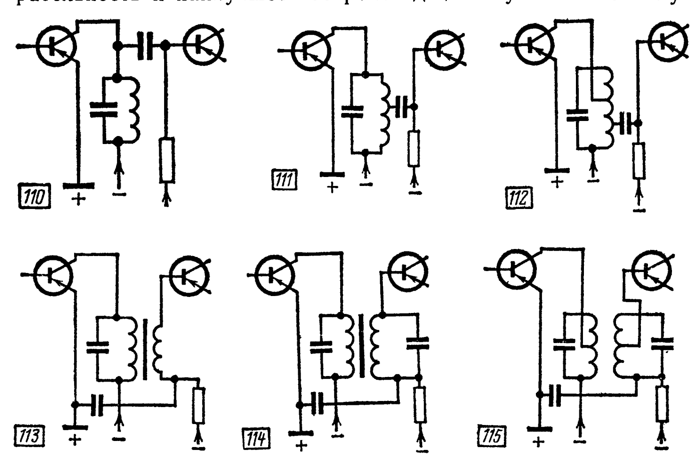


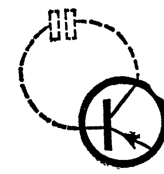
Рис. 110—115. Схемы межкаскадной связи.

110 — Схема связи с одиночным колебательным контуром; *111* — схема автотрансформаторной связи со следующим каскадом. Здесь сопротивления согласованы лучше, чем в предыдущей схеме; *112* — для уменьшения затухания, вносимого в колебательный контур выходным сопротивлением предыдущего транзистора, последний соединяет лишь с частью витков катушки колебательного контура; *113* — схема трансформаторной связи с колебательным контуром; *114* — схема связи с двумя индуктивно связанными колебательными контурами, образующими полосовой фильтр; *115* — та же схема, что и на рис. *114*, но с автотрансформаторным включением обоих транзисторов. Это обеспечивает лучшую избирательность, так как вносимое транзисторами в колебательные контуры затухание уменьшается.

чить, применив трансформатор с настроенной первичной обмоткой (рис. 113) или, еще лучше, с обеими настроенными обмотками (рис. 114, 115). Последнее часто используется в каскадах промежуточной частоты, где такие трансформаторы при правильном выборе связи между обмотками представляют прекрасные полосовые фильтры.

Н. — Это значит, что они пропускают всю полосу модулирующих частот, но очень сильно ослабляют все частоты вне этой полосы.

Л. — Да, Незнайкин. Ты не забыл, что это наилучший способ решить противоречие между высокой избирательностью и верным воспроизведением музыки.



НЕВИДИМАЯ ОПАСНОСТЬ

Н. — Я убеждаюсь, что если заводы, выпускающие катушки индуктивности, правильно выполняют свою работу, то я не столкнусь ни с какими трудностями при реализации своих каскадов высокой и промежуточной частоты.

Л. — Огорчен, но вынужден окатить твой безмятежный оптимизм ушатом холодной воды. В транзисторе имеется скрытая опасность, которая поджидает тебя и может причинить немало неприятностей.

Н. — Ну так что же, я предпочитаю сражаться с открытым забралом. Что же представляет собой эта твоя новая ловушка?

Л. — Это внутренняя емкость между коллектором и базой. Если на входе и на выходе ты имеешь контуры, настроенные на одну частоту, то этой емкости (которая может быть порядка нескольких десятков пикофарад(достаточно, чтобы образовать между контурами связь, превращающую мирный транзистор в генератор высокочастотных колебаний.

Н. — Вспомнив, что для предотвращения подобных связей, возникающих из-за емкости между анодом и сеткой в лампах-триодах, между этими электродами установили экранирующую сетку, на которую подается постоянный потенциал, я подозреваю, что так же поступают и в транзисторах.

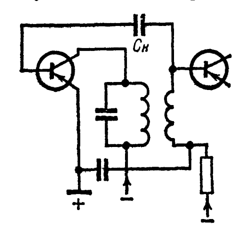
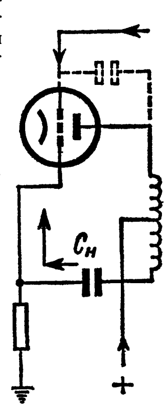


Рис. 116. Конденсатор $C_н$ служит для нейтрализации действия внутренней емкости коллектор — база

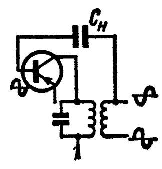
Л. — В некоторой мере ты прав: так устроены транзисторы *p-n-i-p*, о которых мы уже говорили. Слой беспримесного полупроводника (*i*) в определенном смысле играет роль экрана, снижающего емкость база — коллектор. В дрейфовых моделях транзисторов также имеется зона, удаляющая коллектор от базы. А при работе с обычными транзисторами для предотвращения самовозбуждения используют метод, предложенный для высокочастотных схем на лампах еще до изобретения тетродов. Этот метод заключается в нейтрализации паразитной емкости путем приложения на управляющий электрод напряжений такой же амплитуды, но в противофазе. В ламповых схемах для этого использовался маленький «нейтродинный» конденсатор, который часть усиленного напряжения передавал на сетку в противофазе.



Н. — По-моему, это своего рода обратная связь, и в транзисторных схемах она должна подаваться на базу. Но как в этих условиях выполнить требование о противофазе? Нужно ли включать специальный фазоинверторный каскад?

Л. — К чему такие усложнения? Всегда можно найти точку, где напряжение будет в противофазе по отношению к напряжению на коллекторе. В случае трансформатора с ненастроенной вторичной обмоткой один из выводов этой обмотки и является такой точкой (рис. 116).

Н. — Следовательно, его просто-напросто соединяют с базой через конденсатор $C_н$, емкость которого подобрана так, чтобы напряжения имели ту же амплитуду, что и напряжения, проходящие через емкость коллектор — база. А почему нельзя применять этот же способ с трансформатором, у которого вторичная обмотка тоже настроена? Разве у него на одном из выводов вторичной обмотки не появляется напряжение с фазой, противоположной напряжению на первичной обмотке?



Л. — Увы, нет! После настройки вторичной обмотки напряжение на ее концах сдвинуто по фазе только на четверть периода. Это несколько усложняет дело, и для получения нейтрализующего напряжения приходится применять небольшую

вспомогательную обмотку. Однако вместо нее можно сделать у первичной обмотки вывод для соединения с отрицательным полюсом источника питания. Тогда конец первичной обмотки, расположенный по другую сторону от части, соединенной с коллектором, будет иметь напряжение в противофазе с напряжением на коллекторе. И нам остается только снять это напряжение и приложить его через конденсатор $C_н$ к базе (рис. 117).

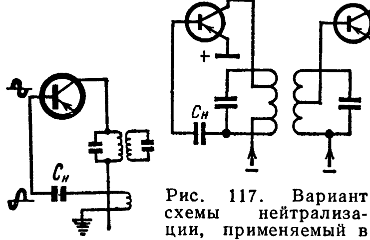


Рис. 117. Вариант схемы нейтрализации, применяемый в усилителях с полосовыми фильтрами.

Н. — А всегда ли нужно прибегать к нейтрализации в каскадах высокой и промежуточной частоты?

Л. — Нет. Часто затухания, вызванного малым сопротивлением транзисторов, достаточно, чтобы устранить всякую возможность самовозбуждения. А при транзисторах структуры *p-n-i-p* и дрейфовых транзисторах нейтрализация, как правило, не нужна вообще. Впрочем, заметь, Незнайкин, что я не изображал на схемах, чтобы сделать их более наглядными, никаких устройств температурной стабилизации (обратная связь с помощью резистора в цепи эмиттера), которые тоже применяются в каскадах высокой и промежуточной частоты.

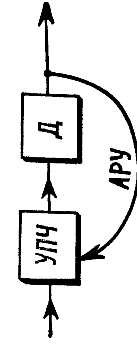
АВТОМАТИЧЕСКАЯ РЕГУЛИРОВКА УСИЛЕНИЯ

Н. — Можно ли в транзисторных схемах сделать автоматическую регулировку усиления (АРУ), зависящую от величины принимаемых сигналов? Я хочу сказать — такую регулировку, которая бы служила не только для сглаживания замирания сигнала, но и для устранения любых колебаний принимаемого сигнала, как, например, при проезде автомобиля с приемником под металлическим мостом.

Л. — АРУ в транзисторных схемах строится по тем же принципам, что и в ламповых схемах. Ты знаешь, что усиление транзистора зависит от его крутизны, которая в свою очередь изменяется от тока эмиттера. Следовательно, изменяя смещение базы, можно изменять усиление. Если используется, как это обычно бывает, транзистор структуры *p-n-p*, то ток эмиттера, а следовательно, и усиление можно уменьшить, сделав базу менее отрицательной.

Рис. 118. Усилительный каскад высокой или промежуточной частоты, управляемый системой автоматической регулировки усиления (АРУ).

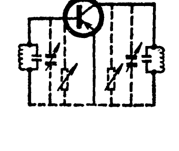
Н. — А, я догадался, для этой цели используют напряжение, снимаемое после детектирования и усредненное с помощью сопротивления, развязанного емкостью.



Л. — Правильно, однако и здесь следует иметь в виду, что управление транзистором требует не напряжения, а мощности. Поэтому часто приходится снимать регулирующее напряжение после усиления постоянной составляющей полученного от детектора сигнала. Позднее ты увидишь, что в этом нет ничего сложного.

Н. — А пока я вижу (рис. 118), что каскады высокой и промежуточной частоты управляются довольно простой системой АРУ. Напряжение, которое должно быть тем более положительно, чем сильнее сигнал, поступает на базу через резистор R_1. Другой резистор R_2, соединенный с отрицательным полюсом источника питания, вместе с R_1 образует делитель напряжения. Таким образом, средний потеницал базы будет изменяться: он будет тем отрицательней, чем слабее сигнал, что повлечет за собой увеличение усиления. При сильных сигналах, наоборот, потенциал базы будет менее отрицательным, что приведет к снижению усиления. Итак, все будет прекрасно!

НЕПРЕДВИДЕННАЯ ТРУДНОСТЬ



Л. — Я еще раз вынужден омрачить твою радость: твой оптимизм не так уж обоснован. Не забывай, что в транзисторе все взаимосвязано и что каждое изменение одной из величин резко изменяет все другие. В данном случае входная и выходная емкости изменяются одновременно и в том же направлении, что и величина тока эмиттера.

Н. — Значит, регулирующее напряжение своими изменениями вызывает еще и расстройку колебательных контуров, включенных на выходе и входе транзистора?

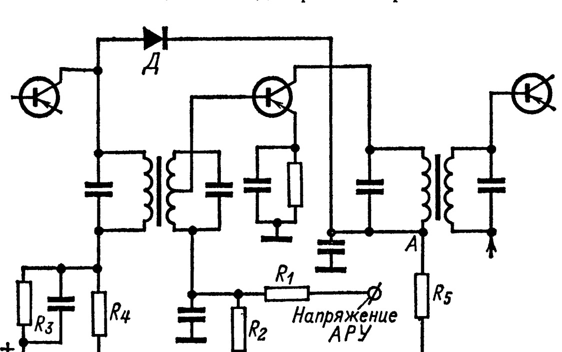


Рис. 119. Схема усиленной АРУ с диодом *Д*, вносящим переменное затухание в первый колебательный контур.



Л. — Ну, да, Незнайкин, но этим, однако, не ограничиваются неприятности, так как входное и выходное сопротивления также изменяются в зависимости от тока эмиттера, но в противоположном направлении.

Н. — А это важно? Ведь увеличение этих сопротивлений лишь меньше будет шунтировать контуры на входе и выходе. И приемник станет более избирательным...

Л. — ...и поэтому он хуже будет воспроизводить звук, так как полоса пропускания станет более узкой и мы лишимся высоких звуков при приеме сильных сигналов.

Н. — За время, которое я тебя знаю, Любознайкин, я понял твой метод, который состоит в том, чтобы накапливать самые большие трудности, а затем устранять их как бы по мановению волшебной палочки. Так будь любезен и ударь своей волшебной палочкой.

Л. — По правде говоря, тебе следует удовлетвориться компромиссом, так как нелегко устранить все недостатки, которые я тебе указал. Для этой цели можно усилить действие регулятора, воздействуя одновременно на затухание настроенного контура, с тем чтобы повысить это затухание, когда сигналы становятся более сильными. Вот очень ловко придуманная схема, позволяющая это сделать (рис. 119). Ты найдешь здесь тот же способ управления усилением при помощи постоянной составляющей напряжения детектированных сигналов, которое прикладывается к базе транзистора. Но, кроме того, ты неожиданно для себя обнаружишь в схеме необычайный диод *Д*, включенный между выводом одного из входных контуров и резистором развязки R_5 в цепи коллектора. Попробуй проанализировать его значение.

Н. — Хорошо. Допустим, что принимаемые сигналы становятся сильнее. Напряжение, поступающее через резистор R_1 на базу второго транзистора, будет делать базу менее отрицательной, и ток эмиттера этого транзистора уменьшится. Ток коллектора также уменьшится. Значит, уменьшится падение напряжения, создаваемое этим током на резисторе R_5. Это приводит к тому, что точка *A* станет более отрицательной и пропускаемый диодом *Д* ток увеличится, потому что прикладываемое к диоду в прямом направлении напряжение возрастет. Вот и все...

Л. — Нет, это не все. Потому что цепь, в которую входит диод (я провел ее жирной линией), как ты видишь, шунтирует наш первый настроенный контур. Тот факт, что ток в этой цепи увеличивается, означает, что ее сопротивление уменьшается. Следовательно, эта цепь вносит в первый колебательный контур затухание, увеличивающееся при приеме сильных сигналов.



Н. — Я понял в чем дело! Для сильных сигналов, когда внутренние сопротивления транзисторов повышаются, ты искусственно ввел здесь сопротивление, которое уменьшается. И, таким образом, мы одним изменением компенсируем другое. Кроме того, возросшие потери в контуре снижают усиление, что усиливает действие АРУ.

Л. — Незнайкин, мне кажется, что скоро ты будешь учить меня теории и практике транзисторов...

◎

БЕСЕДА ТРИНАДЦАТАЯ

ОТ ВЫСОКОЙ К ПРОМЕЖУТОЧНОЙ, А ЗАТЕМ К НИЗКОЙ ЧАСТОТЕ

Теперь Незнайкин знает, как транзисторы могут усиливать сигналы высокой, промежуточной и низкой частоты. Но он еще находится в неведении, как осуществляется переход от одной частоты к другой. Поэтому Любознайкин открывает ему здесь тайны преобразования частоты и детектирования. Попутно он рассмотрит некоторые схемы генераторов на тразисторах.

Содержание: Диодное детектирование. Практические схемы. Детектирование с помощью транзистора. Регенеративный детектор. Схемы генераторов. Преобразование частоты с отдельным гетеродином и при помощи одного транзистора.

ПОСЛЕДНИЕ БЕЛЫЕ ПЯТНА



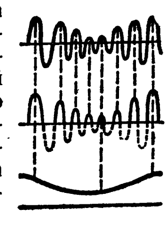
Незнайкин. — В эпоху, когда на карте Луны для нас больше нет секретов и белых пятен, я помимо своей воли думаю о тех картах, которые своими белыми пятнами «неизведанных земель» были отрадой наших дедов и предоставляли полную свободу воображению Жюля Верна и его конкурентов.

Любознайкин. — Я прекрасно вижу, к чему ты клонишь. В цепочке каскадов, составляющей радиоприемник, для тебя осталось два белых пятна: преобразование частоты и детектирование. Мы восполним этот пробел довольно легко, тем более что здесь ни одна западня не поджидает нас и ты практически знаешь, как осуществляется детектирование с помощью диода.

Н. — Правда, некогда мы с тобой уже разбирали, как диод выпрямляет высокочастотный сигнал, после чего односторонние полупериоды, усредненные емкостью, создают на сопротивлении нагрузки низкочастотное напряжение.

ДЕТЕКТИРОВАНИЕ — ВЫПРЯМЛЕНИЕ

Л. — Так вот схема (рис. 120), в которой для тебя нет ничего неизвестного.



Точечный диод *Д* выпрямляет ток, поступающий с последнего трансформатора премежуточной частоты, и создает на выводах резистора *R* напряжение, высокочастотная пульсация которого сглаживается конденсатором C_1, причем выявляется составляющая низкой частоты. Перемещая подвижной контакт потенциометра *R*, можно снимать для дальнейшего усиления бóльшую или меньшую часть этого напряжения, регулируя таким образом громкость. Электролитический конденсатор C_2 передает низкочастотный сигнал на базу транзистора первого каскада усиления низкой частоты, одновременно изолируя цепь базы от схемы детектора по постоянному току.

Н. — Для чего поставлен здесь резистор R_2?

Л. — Для предотвращения чрезмерного снижения сопротивления нагрузки диода из-за шунтирующего входного сопротивления транзистора. При этом уменьшается затухание, вносимое схемой детектора в последний колебательный контур промежуточной частоты, и повышается эффективность работы детектора при малых сигналах. Этому также способствует небольшое смещение диода в прямом направлении, созда-

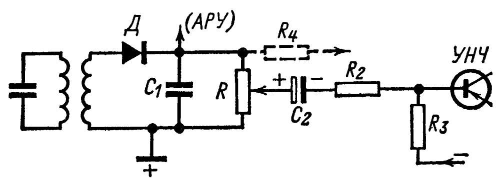


Рис. 120. Схема диодного детектора с трансформаторной связью с последним колебательным контуром промежуточной частоты.

ваемое при помощи резистора R_4, который присоединяется к отрицательному полюсу батареи и выводит рабочую точку диода на участок характеристики с наибольшей кривизной. Соответствующее этой точке «пороговое» напряжение точечных диодов составляет примерно 0,25 *в* (рис. 121).

Н. — Я вижу, что ты от этого же детектора получаешь напряжение для АРУ.

Л. — Да, но я не уверен, что напряжения, получаемого на нагрузке детектора, всегда достаточно для успешной работы АРУ. Однако, прежде чем говорить об усиленной АРУ, я хочу предложить тебе разобраться самому в действии одной более «изысканной» схемы диодного детектора. Вот посмотри (рис. 122).

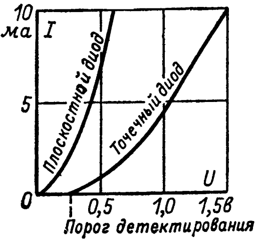
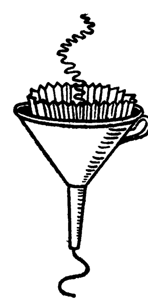


Рис. 121. Зависимость тока диода от приложенного к нему напряжения. Следует обратить внимание на худшую чувствительность точечного диода к малым напряжениям (заметный ток появляется только при напряжении порядка 0,25 *в*).

Н. — Я этого не боюсь. От предыдущей схемы она отличается цепочкой $C_3R_7C_4$ — настоящим небольшим фильтром, пропускающим низкие частоты, предназначенным для устранения всяких следов промежуточной частоты в напряжении, поступающем на усилитель низкой частоты. Кроме того, ты создаешь регулирующее напряжение для системы АРУ на особом резисторе R_5, заблокированном конденсатором C_5. Чтобы этот конденсатор не шунтировал цепи низкочастотного сигнала, ты соединил точку *А* с диодом через резистор R_6. Кроме того, при помощи резистора R_4, присоединенного к отрицательному полюсу источника питания, ты подаешь на базы регулируемых транзисторов начальное смещение. Одним словом, здесь цепи низкой частоты лучше отделены от цепей АРУ. Но я хотел бы знать, как ты осуществляешь усиленную АРУ.



Л. — Очень просто, путем детектирования с помощью транзистора (рис. 123), точнее говоря, с помощью эмиттерного *р-п* перехода, который также представляет собой диод.

Его пороговое напряжение значительно меньше, чем у точечных диодов, так что небольшого отрицательного смещения, порядка 0,1 *в*, создаваемого делителем напряжения R_1 R_2, достаточно, чтобы сделать возможным детектирование сигналов с малой амплитудой. Запомни получше, что это смещение не должно превышать 0,1 *в;* без этого условия транзистор

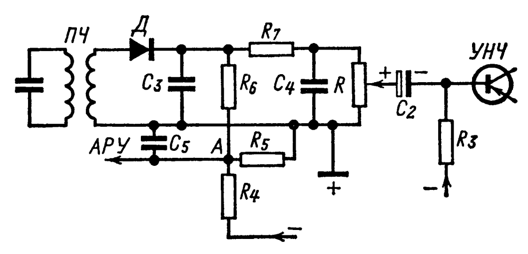


Рис. 122. Схема детектора, создающего напряжение АРУ на отдельном резисторе R_5. Пульсации выпрямленного диодом тока сглаживаются конденсатором C_5.



вместо детектирования начнет усиливать колебания промежуточной частоты, что нам совершенно не нужно... Открываясь же только при отрицательных полупериодах входного напряжения, транзистор будет создавать в цепи коллектора лишь токи, соответствующие этим полупериодам.

Н. — Но это в точности повторяет детектирование на изгибе анодной характеристики электронной лампы! И я прекрасно вижу, что произойдет дальше. Наши односторонние импульсы коллекторного тока создадут на нагрузочном со-

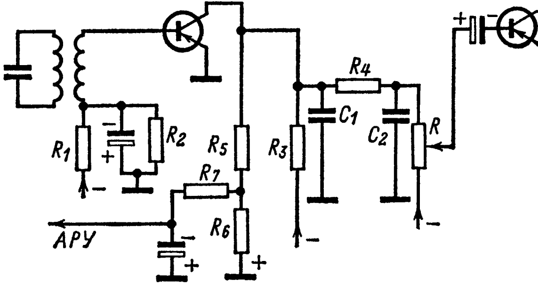
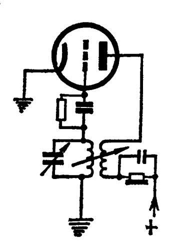


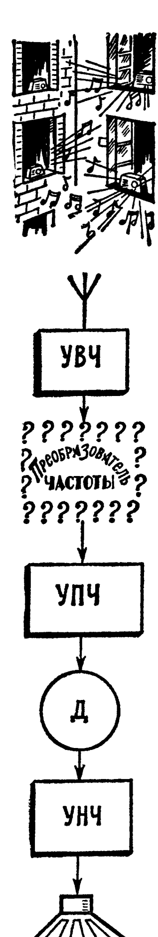
Рис. 123. Схема детектора с транзистором, одновременно усиливающим напряжение АРУ.

противлении транзистора усиленное напряжение низкой частоты, которое после отфильтровывания цепочкой $C_1R_4C_2$ высокочастотной составляющей подается на усилитель низкой частоты. Между выходом фильтра и входом усилителя низкой частоты ты поставил потенциометр R для ручной регулировки громкости.



Л. — Правильно; кроме того, ты можешь отметить наличие резистора R_6, который вместе с резистором R_5 образует делитель выходного напряжения детектора. С этого делителя через резистор R_7 снимается регулирующее напряжение на базы транзисторов, управляемых цепью АРУ.

ПРОТИВОПОЛОЖНОСТЬ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ



Н. — Как я вижу, это регулирующее напряжение действительно усиливается. И если мы говорим о детектировании, то я хотел бы спросить тебя, можно ли осуществить с помощью транзистора регенеративный детектор, — то самое устройство, которое всегда меня восхищало своей чрезвычайно высокой чувствительностью.

Л. — Конечно да. Для этого достаточно подать во входную цепь часть усиленной энергии из выходной цепи детектора. Само собой разумеется, нужно, чтобы...

Н — ...напряжение обратной связи находилось в фазе с входным напряжением. В противном случае мы создадим отрицательную обратную связь и вместо повышения усиления снизим его.

Л. — Необходимо соблюдать и еще одно условие: связь между входной и выходной цепями не должна превышать определенной нормы, иначе...

Н. — ...наш регенераторный детектор превратится в генератор высокой частоты, и его неуместное излучение создаст интерференционные свисты в расположенных поблизости приемниках.

Л. — Это происходит тогда, когда из выходной цепи во входную подается энергии больше, чем поглощается входной цепью. Ты знаешь, Незнайкин, что генератор высокой частоты не всегда является причиной разногласий с соседями. В надлежащем исполнении именно такой генератор позволяет осуществлять преобразование частоты в супергетеродинном приемнике.

Н. — Я в восторге от того, что ты занялся последним «белым пятном» на моей географической карте. Предполагаю, что характерная для транзисторов гибкость позволит сделать большое количество различных схем гетеродинов.

Л. — И ты не ошибаешься. Действительно, колебательный контур можно включить либо в цепь коллектора, либо в цепь эмиттер — база, заземлить можно или эмиттер, или базу, подавая напряжение обратной связи соответственно на базу или на эмиттер. Наконец, можно сделать гетеродин только с одной катушкой, которая одновременно будет входить в колебательный контур и служить для создания обратной связи.

Н. — Если ты позволишь, то я попытаюсь составить одну простую схему гетеродина (рис. 124). Я включу настраивающийся контур в цепь коллектора; катушка L_1 этого контура связана с катушкой L_2, сигнал с которой через конденсатор C_2 подается на базу транзистора, а смещение базы обеспечивается резистором R. Будет ли моя схема генерировать?

Л. — Вне всякого сомнения, если ты правильно сориентируешь направление витков катушек.

Н. — Как, не прибегая к практической проверке, установить, выполнено ли это условие?

Ц. — Вспомни схему индуктивной трехточки, транзисторный вариант которой я для тебя приготовил (рис. 125). Как ты видишь, на пути от коллектора к базе ток протекает по виткам катушки всегда в одном направлении. Примени это правило к изображенной тобой схеме (рис. 124). Если в катушке L_1 ток, идя от коллектора к отрицательному полюсу, протекает по виткам в направлении движения часовой стрелки, то сделай так, чтобы в катушке L_2 по пути от отрицательного полюса к базе ток протекал по виткам в этом же направлении.

Н. — А если заземлена база и мы подаем напряжение обратной связи на эмиттер, то, несомненно, следует изменить направление витков катушек.

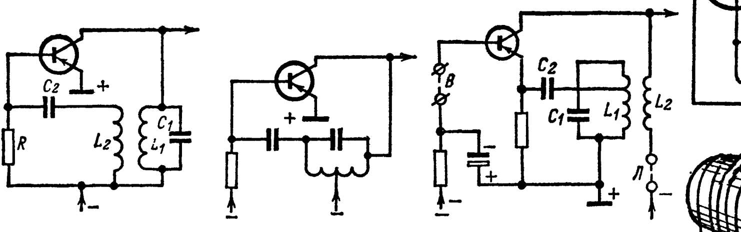


Рис. 124. Схема генератора с колебательным контуром в цепи коллектора и с катушкой обратной связи в цепи базы.

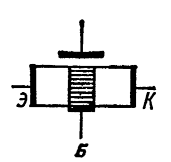
Рис. 125. Генератор можно собрать и с одной катушкой, если сделать от нее отвод. На рисунке изображена схема такого генератора, называемая «индуктивной трехточкой».

Рис. 126. Наиболее распространенная схема генератора с настраиваемым контуром в цепи эмиттера. Колебательный контур индуктивно связан с коллекторной цепью транзистора при помощи катушки обратной связи L_2.

Л. — Разумеется. Если обратиться к схеме на рис. 126 с колебательным контуром L_1C_1 в цепи эмиттера, то катушка связи L_2, включенная в цепь коллектора, должна ориентироваться в обратную сторону по сравнению с катушкой L_1.

ТРИОДЫ ПОД ВСЕМИ СОУСАМИ

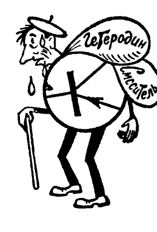
Н. — Мне кажется, что я мог бы нарисовать добрый десяток схем различных генераторов. Но ведь ты говоришь мне о них только для того, чтобы перейти к вопросу преобразования частоты. Однако я чувствую себя в тупике. Как сделать гетеродин-преобразователь на транзисторах, которые представляют собой всего лишь полупроводниковые триоды? Нет ли возможности сделать полупроводниковые гексоды, гептоды и октоды?



Л. — До сих пор таких приборов не сделали. Может быть и можно сделать полупроводниковые приборы с двумя управляющими электродами, воздействуя на ток одновременно потенциалом базы и электрическим полем другого электрода, которое отклоняло бы электроны с прямого пути... Но пока можно прекрасно обойтись нашими триодами. Разве первые супергетеродины не были сделаны в ту пору, когда была известна лишь лампа с тремя электродами?

Н. — Скорей рассказывай, как с помощью только одного транзистора ты и создашь колебания, и наложишь их на поступающие из антенны колебания высокой частоты, и осуществишь детектирование, выделяя в результате всего этого составляющую промежуточной частоты?

Л. — Очень просто, Незнайкин! Возьми генератор, схема которого изображена на рис. 126, включи в точке *В* контур, настроенный на частоту антенны, включи затем в точке *П* первичную обмотку трансформатора промежуточной частоты, и ты получишь схему, показанную на рис. 127. Если контур C_2L_2 гетеродина настроен на частоту, отличающуюся от частоты принимаемых сигналов на величину промежуточной



частоты, то преобразование частоты осуществляется без каких бы то ни было трудностей.

Н. — Действительно, ты вводишь в цепь базы сигнал, возбуждаешь собственные колебания между эмиттером и коллектором и, конечно, пользуешься нелинейностью характери-

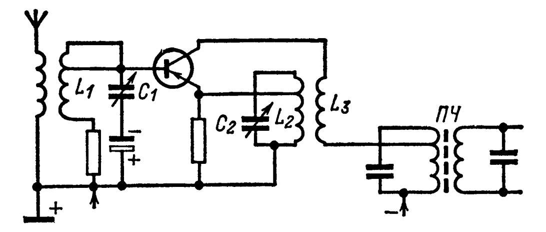


Рис. 127. Схема преобразователя частоты, полученная непосредственно из схемы генератора, показанной на рис. 126.

стики транзистора, на который подается соответствующее смещение, чтобы детектировать биения. Такой метод эксплуатации бедного транзистора, нагрузка его таким обилием разнообразных функций, мне кажется, возвращает нас к худшим временам рабства.

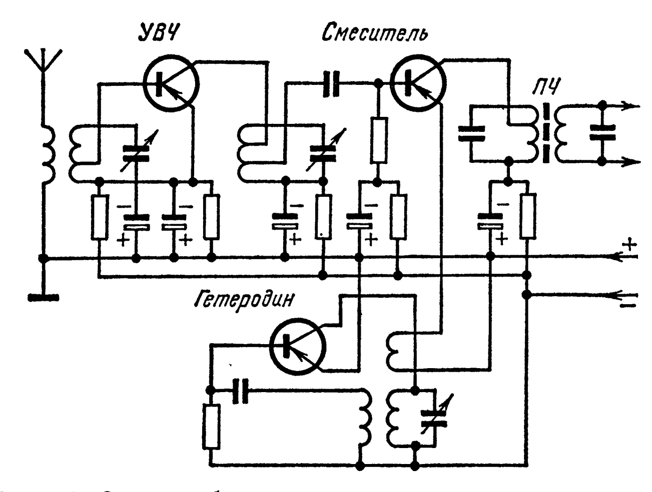
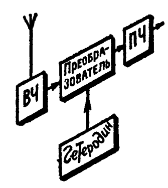


Рис. 128. Схема преобразователя частоты с отдельным гетеродином.



Л. — Транзистор от этого не чувствует себя намного хуже. Но если ты хочешь четко разграничить функции гетеродина и смесителя, что бывает вполне целесообразно на коротких волнах, то можешь прибегнуть к помощи отдельного гетеродина (рис. 128).

Н. — Я нахожу это весьма симпатичным. И с радостью отмечаю, что для меня на карте чудесной страны транзисторов нет больше белых пятен.

◎

БЕСЕДА ЧЕТЫРНАДЦАТАЯ

ВАГОНЫ И ПОЕЗДА

Этой последней беседой заканчивается путешествие наших друзей по чудесной стране транзисторов; не уместно ли в связи с этим поставить вопрос о поездах?..

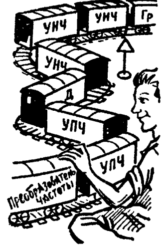
Последняя встреча позволит Любознайкину и Незнайкину применить приобретенные знания для объяснения полной схемы радиоприемника на транзисторах.

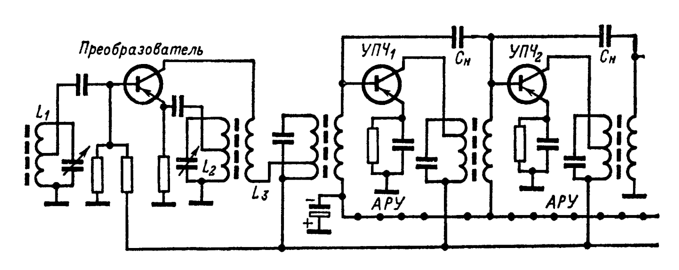
Основываясь на усвоенных в прошлом понятиях, наши друзья бросят взгляд на прекрасные перспективы будущего, открывающиеся перед транзисторами.

Содержание: Полная схема приемника. Ферритовая антенна. Разнообразные применения транзисторов. Преобразователь постоянного тока. Будущее транзисторов.

РАЗВЛЕЧЕНИЯ ДЛЯ ВЗРОСЛЫХ, ПОКОЙ ДЛЯ ДЕТЕЙ

Незнайкин. — Не удивляйся, Любознайкин, тому, что я играю игрушечным электрическим поездом. Он предназначен для моего маленького племянника, и я проверяю исправность телеуправления и стрелок.





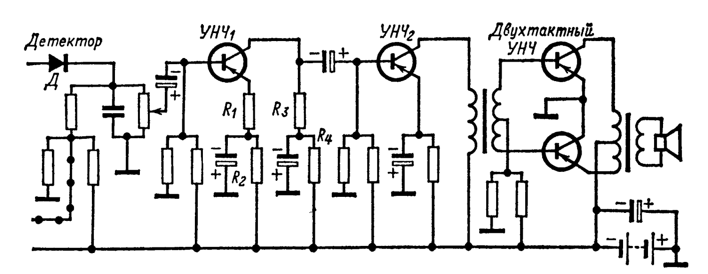
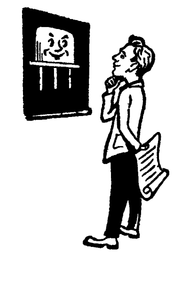


Рис. 129. Типовая схема портативного радиоприемника на транзисторах, составленная из рассмотренных ранее каскадов. На схеме не указаны номиналы резисторов и конденсаторов, так как они зависят от типов применяемых транзисторов.

Любознайкин. Да, именно это говорят отцы, дарящие своим сыновьям электрический поезд, потому что они не осмеливаются признать, как это забавляет их самих... Но ты испортишь своего племянника. Какое разнообразие вагонов! Пассажирские вагоны всех классов, спальные, вагон-ресторан, вагоны-холодильники, цистерны, платформы; к чему бы это?..

Н. — Это позволяет получать бесконечное количество различных железнодорожных составов.



Л. — Точно так же изученные нами схемы различных каскадов на транзисторах позволяют составлять бесчисленное множество разных радиоприемников. Было бы немыслимо пожелать рассмотреть их все. Но если ты хочешь, мы в качестве примера разберем одну полную схему, состоящую из вагонов... я хотел сказать из следующих каскадов: преобразователя частоты, как на рис. 127; двух каскадов усиления промежуточной частоты, как на рис. 116, но с отводами в первичной обмотке, чтобы уменьшить затухание, вносимое в контур предшествующим транзистором; детектора, как на рис. 120; двух каскадов низкой частоты на резисторах, как на рис. 91; оконечного двухтактного каскада, как на рис. 102.

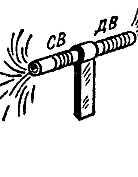
Прошу тебя внимательно рассмотреть эту схему (рис. 129), по которой с некоторыми отличиями в деталях собрано большинство портативных радиоприемников, нарушавших твой покой на пляже. Видишь ли ты в ней что-нибудь, что могло бы тебя заинтересовать?

МИНИАТЮРНАЯ АНТЕННА

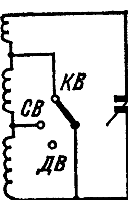
Н. — Меня заинтриговало то, чего я не вижу, а именно — антенны.

Л. — В радиоприемнике ее нет. Входная катушка L_1 намотана на длинный ферритовый стержень, концентрирующий энергию электромагнитных волн и выполняющий функции антенны.

Н. — Очевидно, диаметр такой катушки должен быть значительным, чтобы подобно рамочной антенне собирать достаточную энергию?



Л. — Нет, так как феррит представляет собой магнитную керамику с высокой проницаемостью. Он как бы вдыхает в себя все находящиеся поблизости магнитные поля, благодаря чему небольшая катушка, диаметр которой не превышает сантиметра, может иметь такую же восприимчивость, как большая рамочная антенна. Феррит обладает также эффектом направленности, что заставляет соответствующим образом ориентировать портативные приемники и повышает их избирательность, ибо снижает влияние помех, поступающих с других направлений. Обрати внимание, Незнайкин, на то, что вместо одной катушки L_1 (а также и вместо катушек гетеродина L_2 и L_3) обычно устанавливают несколько катушек с переключателем, причем каждая из катушек соответствует определенному диапазону волн. Поэтому мы имеем две катушки в приемниках, рассчитанных на прием длинных и средних волн. А если необходимо принимать и короткие волны, то добавляют третью катушку, соединенную с небольшой штыревой антенной, потому что прием коротких волн на ферритовую антенну не дает хороших результатов. Есть ли для тебя еще какие-либо неясные моменты?



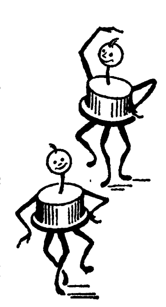
ВСЕ ЯСНО

Н. — Ей богу нет. Я вижу, что смещение всех баз достигается с помощью делителей напряжения.

Л. — Для облегчения налаживания самодельных приемников бывает полезно сделать эти делители регулируемыми, устанавливая для этого вместо одного из резисторов каждого делителя реостат. Чрезвычайно важно правильно выбрать рабочую точку.

Н. — Я предполагаю, что мощные транзисторы, образующие оконечный двухтактный каскад, имеют такое смещение, чтобы работать в режиме *В*, так как это экономит расход батарей.

Л. — Конечно. Могу ли я для проверки твоих знаний спросить, какую роль играют резисторы R_1, R_2, R_3 и R_4?



Н. — Не заблокированный конденсатором резистор R_1 представляет собой элемент отрицательной обратной связи по току. Он уменьшает искажения и повышает входное сопротивление каскада. А кроме того, его действие складывается с действием резистора R_2, который служит для стабилизации рабочей точки транзистора при изменениях температуры. Что же касается R_3, то это классический резистор связи двух каскадов усилителя низкой частоты. Наконец, резистор R_4 со своим конденсатором служит для развязки цепи коллектора, чтобы предотвратить возникновение паразитных связей с другими каскадами через общие цепи питания.

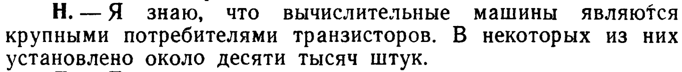
ДОЛГОЙ ЖИЗНИ ТРАНЗИСТОРУ



Л. — Браво, Незнайкин! Мне приятно, что я не потерял зря времени, объясняя тебе работу транзисторов и их применение в усилителях и приемниках.

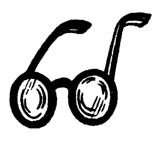
Н. — Чем, однако, ограничивается использование этих «трехлапых существ».

Л. — Ты можешь себе представить, мой дорогой друг, с каким энтузиазмом мы, радиотехники, встретили эти чудесные полупроводниковые приборы, у которых размеры и вес ничтожны, аппетит более чем скромный (по сравнению с аппетитом ламп, требующих тока накала) и которые отличаются изумительной долговечностью. Через десять лет после создания первого транзистора очень серьезные люди уже утверждали, что транзисторы могут работать по крайней мере сто тысяч часов. Забавнее всего в этой истории то, что указанные десять лет содержат всего лишь восемьдесят семь тысяч шестьсот сорок восемь часов! При этом я учел и високосные годы. И тем не менее экстраполяция, к которой так смело прибегли, оказалась правильной, а может быть даже заниженной.



Н. — Я знаю, что вычислительные машины являются крупными потребителями транзисторов. В некоторых из них установлено около десяти тысяч штук.

Л. — Ты понимаешь, какое преимущество в этом случае дают их малые размеры и практически полное отсутствие нагрева?



Н. — Я читал, что эти же малые размеры позволили сконструировать слуховые аппараты, т. е. усилители для тугоухих, размещенные в оглобельках очков.

Л. — Правильно. Ты, очевидно, догадываешься, как высоко ценятся эти качества транзисторов специалистами по космическим ракетам, где на самом строгом учете каждый

грамм, каждый кубический сантиметр и каждый милливатт источников питания.

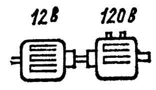
Н. — Короче говоря, во всех областях транзисторы способны выгодно заменить вакуумные лампы.

Л. — Ты слишком спешишь с выводами. Пока еще имеются некоторые области, где лампы остаются незаменимыми, например в мощных передатчиках. Но уже появилось и немало таких проблем, решить которые удалось только с помощью транзисторов. Не говорит ли это тебе, что вакуумные лампы и полупроводниковые приборы могут мирно сосуществовать и каждый из них следует разумно применять с учетом его особенностей.

Мы, несомненно, еще будем иметь возможность поговорить о применении транзисторов в качестве коммутирующих устройств, мультивибраторов, триггеров, в качестве различных типов вагонов, которых ты еще не знаешь, но которые используются для составления различных электронных поездов, имеющих иное назначение, чем прием радиовещательных станций. А пока я приведу тебе только один маленький пример: преобразователь постоянного тока, который значительно проще сделать на транзисторах, чем на электронных лампах.

БЕСШУМНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

Н. — Что ты называешь преобразователем постоянного тока?



Л. — Устройство, позволяющее повысить напряжение источника тока. Некогда для этого нужно было использовать двигатель постоянного тока, который, работая, например, от батареи в 12 *в,* приводил в движение генератор постоянного тока, дающий, скажем, 120 *в.*

Н. — Какая сложность и какой низкий к. п. д.!

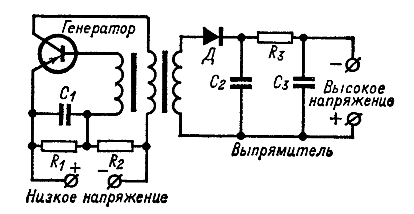


Рис. 130. Преобразователь, позволяющий повысить напряжение источника постоянного тока. Делитель напряжения $R_1 R_2$ служит для подачи на базу транзистора начального смещения.

Л. — А с помощью транзистора (рис. 130) эту операцию можно выполнить без шума, без движения и с лучшей эффективностью. Для этого постоянный ток источника напряжения превращают в переменный. Это делают с помощью транзистора, работающего в качестве низкочастотного блокинг-генератора. Я напомню тебе, что так называют генераторы с сильно связанными обмотками, дающие колебания далеко не синусоидальной формы, что, впрочем, в данном случае идет лишь на пользу экономичности.

Н. — О дальнейшем я догадываюсь. Третья обмотка, насаженная на тот же сердечник, но имеющая значительно больше витков, повышает напряжение переменного тока, после чего остается только выпрямить этот ток диодом и отфильтровать при помощи цепочки, состоящей из резистора R_3 и конденсаторов C_2 и C_3.

Л. — Ты, Незнайкин, еще раз доказал свою изумительную ясность ума, и я тебя поздравляю!

Я думаю, что ты хорошо усвоил мои уроки и что ты не встретишь трудностей в предстоящих путешествиях по лабиринтам транзисторных схем. Однако следует сказать, что полупроводниковая техника непрерывно развивается и завоевывает новые области (в том числе и телевидение) и что прогресс технологии, несомненно, преподнесет нам немало сюрпризов. Поэтому я должен дать тебе добрый совет: не позволяй себе отставать от этого прогресса. Внимательно следи за ним, читай статьи, появляющиеся в технической периодической литературе. Всегда помни слова Фрэнсиса Бэкона: «Тот, кто не обновляется — разрушается, так как неумолимое течение времени все изменяет». И, наконец, без колебаний применяй свои знания на практике и сам экспериментируй со схемами на транзисторах. Тогда ты лучше осознаешь тот факт что...

Н. — ...транзистор?.. Это очень просто!

⊚

МИКРОЭЛЕКТРОНИКА

ПИСЬМО ЛЮБОЗНАЙКИНА НЕЗНАЙКИНУ

Дорогой друг Незнайкин!

Как обещал тебе сегодня утром во время разговора по телефону, я попытаюсь кратко изложить прогресс в области полупроводниковой техники, происшедший со времени нашей последней встречи.

Создание транзистора открыло путь к миниатюризации электронной аппаратуры. Малые размеры кристаллического триода и практически полное отсутствие излучения тепла (за исключением мощных транзисторов) позволили значительно уменьшить габариты всех электронных аппаратов.

Но сейчас мы переживаем новый этап — этап микроэлектроники. Чтобы рассмотреть структуру устройств, реализуемых в настоящее время на базе полупроводниковой техники, необходимо прибегать к помощи микроскопа. Осуществленная в интегральных схемах плотность монтажа измеряется тысячами компонентов на кубический сантиметр.

Как достигается такое снижение размеров? Я постараюсь объяснить это тебе.

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ

Уже существует множество новых микроминиатюрных устройств и каждый год появляются все новые. Поэтому было бы не разумно пытаться рассмотреть здесь все такие устройства.

Но было бы полезно описать основные технологические процессы, используемые для изготовления этих разнообразных приборов от простого планарного транзистора до интегральных схем. (Наберись терпения, дорогой друг, чуть дальше я объясню тебе значение этих терминов). Так вот основные используемые в наши дни технологические процессы.

Окисление кремния. Изолирующий слой на поверхности кремния (основного используемого в микроэлектронике полупроводникового материала) может создаваться путем окисления самого кремния. Для этого кремний нагревается до температуры от 800 до 1 300°С в атмосфере кислорода или паров воды. В результате такого воздействия его поверхность покрывается тонким слоем двуокиси кремния (она известна под названием кварца), представляющего собой прекрасный изолятор. Толщина этого слоя меньше одного микрона или микрометра (тысячной доли миллиметра).

Эпитаксиальный процесс. Удельное сопротивление содержащего примеси кремния очень мало, что в некоторых случаях является серьезным недостатком. Его устраняют путем наращивания эпитаксиального слоя, в ко-

тором молекулы кремния образуют безупречную кристаллическую структуру. Об этом свидетельствует сама этимология термина: «эпи» по гречески означает «над» (отсюда происходит слово «эпидермис»— кожный покров), а «таксис» также по гречески означает «порядок». Кремний, расположенный под эпитаксиальным слоем, служит для последнего механической подложкой.

Для формирования такого слоя, толщина которого может быть от 5 до 15 мкм, кремний нагревают в атмосфере водорода до температуры 1 300° С, а затем температуру постепенно снижают до 1 180° С, впуская в нагретую камеру тетрахлорид кремния. Последний, реагируя с водородом, образует газообразный хлористый водород и атомы кремния, которые в идеальном порядке осаждаются на поверхность полупроводника.

Фотолитографический процесс и маскирование. Изготовители полупроводниковых устройств прибегают к технике, используемой для изготовления типографских клише. Знаком ли ты с ней, Незнайкин?

Коротко говоря, процесс изготовления клише, выпуклые элементы которого смазываются краской и служат для переноса изображения на бумагу, начинается с фотографирования воспроизводимого рисунка на светочувствительной пленке. Во время этой операции можно в заданное число раз увеличить или уменьшить фотографируемое изображение. После этого пленка накладывается на цинковую пластинку, предварительно покрытую лаком, который под воздействием света отвердевает и становится нерастворимым в жидкости, в которой он обычно растворяется. Облучая цинковую пластинку, прикрытую пленкой с негативным изображением рисунка, а затем обрабатывая экспонированную таким образом пластинку жидким растворителем, удаляют лак со всей ее поверхности за исключением участков, образующих изображение. Затем незащищенные участки цинка травятся кислотой; в результате этой операции получают клише с рельефным рисунком.

Именно эта техника широко применяется в микроэлектронике. Рисунок с очень большим уменьшением фотографируют на стеклянную пластинку или на другой светочувствительный материал с прозрачной подложкой. Таким образом получают «маску», где рисунок образован непрозрачным тонким слоем хрома. Эта маска накладывается на поверхность полупроводника, предварительно покрытого светочувствительным лаком, отвердевающим при нагревании до 90° С; этот лак наносится равномерным слоем тоньше микрометра.

Лак через маску облучается сильным светом, который делает нерастворимыми участки, не прикрытые хромовыми элементами изображения. После этого достаточно опустить полупроводниковую пластину в соответствующий растворитель, чтобы лак остался только на участках, которые были защищены. Оставшийся лак делают еще более прочным путем нагрева до 150° С.

И теперь наш полупроводник готов для обработки или жидкостями, способными стравить поверхность, или парами, вносящими примеси p-типа или n-типа, или подвергнуться металлизации частичками алюминия или другого металла с целью соединения различных точек будущей схемы проводящими ток полосками.

Для полноты картины я должен добавить, что в последнее время имеется тенденция вместо видимого света все чаще использовать ультрафиолетовые лучи. Я догадываюсь о выражении удивления в твоем взгляде, дорогой друг. Но для такой замены есть две причины. Во-первых, химическое воздействие ультрафиолетовых лучей сильнее, чем видимого света. (Ты, вероятно, еще не потерял свой бронзовый загар от высокогорного солнца, богатого ультрафиолетовыми лучами). Во-вторых, использование этих очень коротких волн объясняется также и тем, что другие волны ... слишком длинные. Да, мой дорогой друг, волны видимого света длиной от 0,38 мкм (фиолетовый) до 0,78 мкм (красный) слишком длинные. Видишь, до чего мы дошли.

После завершения серии операций, начавшихся с равномерного нанесения лака на поверхность полупроводниковой пластины, лак местами удаляется, образуя «окна», т. е. участки, открытые для различных видов обработки.

Одна из наиболее часто выполняемых после образования «окон» операций заключается в удалении изолирующего слоя двуокиси кремния, покрывающего

поверхность полупроводника. Для этой цели полупроводниковую пластину погружают в ванну, содержащую плавиковую кислоту и фтористый аммоний, и которая растворяет все незащищенные участки двуокиси кремния.

Диффузия. В эти же участки полупроводника можно ввести некоторое количество примесей p-типа или n-типа, если нагреть пластинку в атмосфере паров соответствующих веществ. Примеси можно также наносить на пластинку, нагретую до температуры, необходимой для проникновения примесей через окна, в результате этой операции в полупроводнике в зависимости от используемых материалов образуются p-зоны или n-зоны.

ПЛАНАРНЫЙ ЭПИТАКСИАЛЬНЫЙ ТРАНЗИСТОР

Теперь, после того как мы проанализировали основные фазы производства, мы в качестве примера рассмотрим, каким образом изготовляют одну из наиболее распространенных разновидностей транзисторов — планарный эпитаксиальный транзистор.

Надеюсь, что ты не забыл, что я некогда рассказывал тебе о меза-транзисторе. Можно сказать, что планарный является его прямым потомком. Как показывает само название[1], ему совершенно несвойствен рельеф, характерный для меза-транзистора. Кроме того, он полностью выполняется в тонком эпитаксиальном слое и бо́льшая его часть прикрыта двуокисью кремния. По своим размерам он значительно меньше своего предшественника меза-транзистора. На одной подложке (так называют тонкий диск кремния) одновременно изготовляют несколько десятков или даже несколько сотен транзисторов.

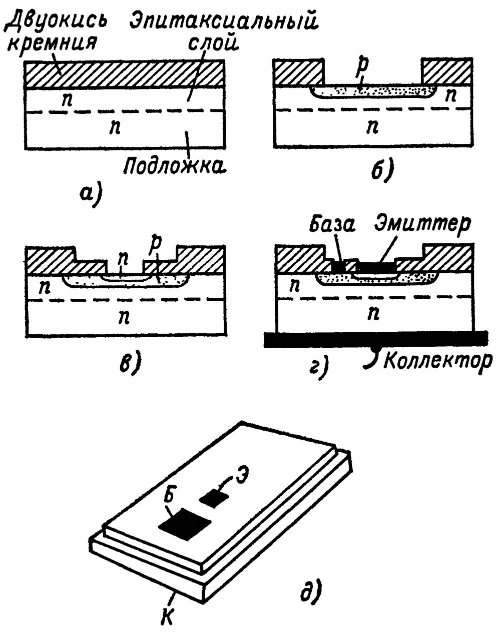


Рис. 131. Последовательные стадии производства планарного транзистора структуры *n-p-n*.

Вот последовательные стадии производства планарного транзистора структуры n-p-n.

1. Подложка (пластина кремния с проводимостью n-типа) чистится и полируется.

2. Уже описанным мною способом на ней выращивается эпитаксиальный слой, не превышающий по толщине 15 мкм и тоже содержащий примеси n-типа.

3. Поверх эпитаксиального слоя наносится изолирующий слой двуокиси кремния (рис. 131, а).

4. Методом фотолитографии с химическим травлением при использовании соответствующей маски в изолирующем слое создается «окно».

5. Через «окно» с помощью диффузии вводят примеси p-типа (обычно бор) — таким образом формируется зона, служащая будущему транзистору базой (рис. 131, б).

6. Всю конструкцию вновь покрывают изолирующим слоем двуокиси кремния.

---

[1] Название «планарный» происходит от английского слова plane — плоский. *Прим. перев.*

7. Вторая фотолитографическая операция с химическим травлением позволяет вскрыть «окно» в центральной части p-зоны.

8. Через это отверстие с помощью диффузии вводят примеси n-типа (например, фосфор) — таким образом формируется эмиттер транзистора (рис. 131, в).

9. В третий раз вся конструкция покрывается слоем двуокиси кремния.

10. Также в третий раз используют фотолитографию, чтобы прорезать крохотные отверстия: одно в зоне эмиттера, а другое в зоне базы.

11. Через эти отверстия наносят слой металла (для этой цели часто используют алюминий), который образует контактные площадки.

12. К маленьким металлическим площадкам припаиваются проволочки, служащие выводами для эмиттера и базы; для коллектора, состоящего из той части эпитаксиального слоя, которая не подверглась воздействию диффузии в предыдущих операциях (операции № 5 и 8), вывод создается путем прикрепления к подложке металлической пластинки (рис. 131, г, д).

Теперь изготовленный описанным способом транзистор остается лишь поместить в корпус. У тебя, дорогой друг, может сложиться впечатление, что описанные мною двенадцать операций обходятся так дорого, что планарный транзистор практически недоступен для применения в аппаратуре. Дело обстоит совершенно иначе — не забывай, что на одной подложке одновременно формируются если не сотни, то десятки транзисторов.

ВЕЛИЧИНА ТОКА И ЕМКОСТЬ

Если ток, идущий от эмиттера через базу к коллектору, велик, то в планарном транзисторе надлежит увеличить площадь перехода эмиттер — база. Однако это одновременно приводит к увеличению емкости между этими

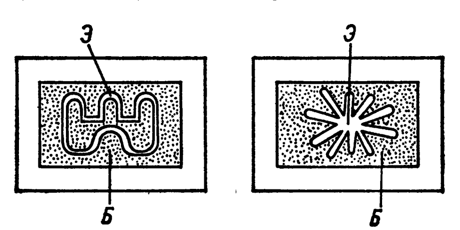


Рис. 132. В планарном транзисторе можно пропускать относительно большие токи, удлиняя контактную линию между зонами эмиттера и базы.

двумя зонами. А мы с тобой знаем все вытекающие из этого отрицательные последствия и в первую очередь ограничения по частоте.

Тем не менее можно без увеличения площади перехода пропускать относительно большие токи (достигающие нескольких сотен миллиампер и даже нескольких ампер); такой результат достигается удлинением контактной линии между зонами эмиттера и базы. Для этого с помощью соответствующих масок эмиттеру придают более или менее причудливую форму. Вместо прямоугольника или круга делают зигзаг, звезду или любую другую более или менее сложную фигуру, образованную узкой линией (рис. 132).

Верхний предел по частоте у высокочастотных планарных транзисторов удается расширить путем создания эмиттера, состоящего из нескольких соединенных параллельно маленьких зон и размещения в этой конструкции выводов эмиттера и базы относительно далеко от этих зон.

Подумай только, дорогой Незнайкин, что все это осуществляется на кусочках подложки, внешние размеры которых в некоторых случаях не превышают трети миллиметра! Такие сложные структуры в таком небольшом объеме... Есть от чего прийти в восхищение.

ИНТЕГРАЛЬНЫЕ СХЕМЫ

Я полагаю, что теперь ты лучше поймешь значение термина микроэлектроника. Но на этом твои удивления не закончатся.

Создав на крохотной пластинке кремния такой сложный ансамбль как планарный транзистор, специалисты пошли дальше, сформировав на одном и том же кусочке полупроводника блок из двух взаимно дополняющих транзисторов (транзистор со структурой p-n-p и транзистор со структурой n-p-n); этот блок, как ты знаешь, используется в некоторых схемах усилителей низкой частоты.

С такой же легкостью им удалось создать в одном кристалле кремния несколько диодов, а затем и других приборов: канальных транзисторов, стабилитронов и т. д.

И, что очень важно, эти различные элементы соединены между собой выводами, сделанными методом металлизации, который я тебе уже описал. Это означает, что таким образом создаются уже не отдельные элементы радиосхемы, а интегральные схемы — т. е. совокупность многих элементов, образующих одно или несколько функциональных устройств, конструктивно оформленных как один элемент.

Такие схемы могут содержать и пассивные компоненты: резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности.

Резисторы. Эти элементы формируются в виде линий, где вводимые в полупроводник примеси дозируются таким образом, чтобы получить заданное сопротивление. Резисторы можно создать также путем нанесения между контактными площадками по поверхности изолятора (двуокиси кремния) тонкого слоя резистивного материала, удельное сопротивление которого, длина и сечение рассчитываются с целью получения заданного сопротивления. Для этого часто используют нихром; придавая резистивному слою самые разнообразные рисунки, можно увеличить длину резистора.

Конденсаторы. Процесс их изготовления более сложный. Для получения конденсаторов небольших емкостей делают просто-напросто диоды, включенные в обратном направлении; эти диоды не пропускают электрический ток, но обладают некоторой емкостью.

Можно также сделать и настоящие конденсаторы; для этого на полупроводник наносят тонкий слой двуокиси кремния, служащий диэлектриком, и покрывают его слоем металла, образующего вторую обкладку конденсатора. Но следует отметить, что все создаваемые в интегральных схемах конденсаторы имеют небольшую емкость.

Катушки индуктивности. Ограничения по величине, о которых я говорил тебе применительно к конденсаторам, еще сильнее проявляются при изготовлении индуктивностей. Можно, конечно, нанести на полупроводник проводящий слой в виде спирали, обладающий определенной индуктивностью. Так делают в схемах, предназначенных для использования на сверхвысоких частотах. Но в принципе в интегральных схемах избегают использования катушек индуктивности.

Запомни, Незнайкин, что обычно стремятся сделать так, чтобы интегральная схема состояла в основном из транзисторов и диодов. При некоторой изобретательности удается заставить эти устройства выполнять самые различные функции: усиление во всех диапазонах частот, генерирование колебаний различной формы и частоты, коммутацию (запирание или открывание цепи — поэтому такие схемы называют «вентилями») и т. д.

ТЕХНОЛОГИЯ ИС

Дорогой друг, ты несомненно догадался, что сокращение ИС обозначает интегральные схемы. Это название охватывает широкую гамму разнообразных устройств, в производстве которых используют уже рассмотренные нами технологические процессы: изоляцию, применение масок, фотолитографию, диффузию, металлизацию и т. д. Но если проанализированное нами в качестве примера производство планарного транзистора требует дюжины операций, то изготовление ИС обычно требует значительно большего количества операций.

Интегральные схемы формируются одновременно десятками или сотнями на одной пластине-подложке, имеющей диаметр 3 см и толщину 0,25 мм.

Среди интегральных схем, которые обычно делают на подложке из изоляционных материалов, в зависимости от метода изготовления различают: тонкопленочные схемы, получаемые вакуумным напылением или катодной бомбардировкой, и толстопленочные схемы, получаемые путем нанесения соответствующих материалов по заранее созданному рисунку.

Сами интегральные схемы занимают ничтожный объем. Но их необходимо соединить золотыми проволочками (проволочки припаиваются под бинокулярным микроскопом), с контактами корпусов, в которые они помещаются. В этом-то и заключается драма! Объем корпуса, который может достигать одной пятой части кубического сантиметра, в тысячу раз больше объема самой ИС. Не находишь ли ты в этом сходство с пауком, лапки которого занимают больше места чем тело?.. Я добавлю, что в производстве интегральных схем дороже всего обходится припайка выводов и монтаж схемы в корпус.

Тем не менее, дорогой Незнайкин, не будем злословить по поводу ИС, являющихся прекрасной победой человеческого гения в области технологии. В дополнение к своей исключительной портативности они обладают многочисленными достоинствами. Прежде всего следует назвать их высокую надежность. Этот термин означает, насколько можно полагаться на исправную работу устройства. А вероятность отказа у ИС очень низкая, так как они сделаны из одного куска твердого тела. В них нет паек, нет и более или менее надежных контактов... Это прочная конструкция, и на нее можно положиться!

При производстве в больших количествах ИС обходятся дешевле эквивалентных схем, собранных из дискретных компонентов. Применение ИС позволяет существенно снизить затраты на рабочую силу.

И, наконец, малые размеры ИС дают еще одно преимущество, о котором часто забывают — очень малое время перехода. В современных электронных вычислительных машинах некоторые операции производятся за время, измеряемое наносекундами, т. е. миллиардными долями секунды. Но какой путь за такую долю секунды может пройти луч света или электрический ток в прекрасном проводнике? Попробуй ответить на этот вопрос, не читая моего письма дальше и не приступая к расчетам, учитывающим скорость 300 000 км/сек.

Согласен поспорить, Незнайкин, что твоя оценка далека от истины, а она гласит, что за одну наносекунду свет или электрический ток проходит 30 см. Это означает, что в ЭВМ, насчитывающих тысячи схем, их нужно расположить достаточно близко одну к другой, чтобы время прохождения тока не замедляло выполнения операций.

НОВАЯ ФИЛОСОФИЯ

Проявление ИС настоятельно требует новой философии конструирования электронной аппаратуры. Некогда разрабатывали схемы включения компонентов, из которых собиралась аппаратура. В наши дни инженер должен придумать цепочку функций, каждая из которых выполняется одной ИС.

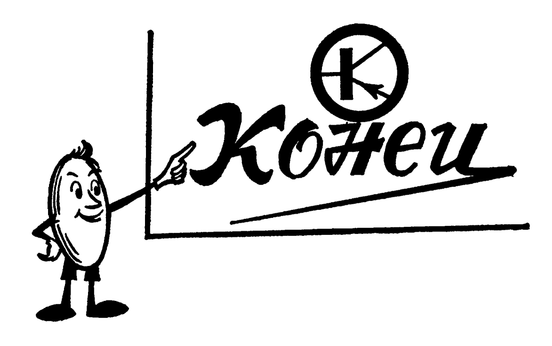
Эволюция ИС продолжается; возможности их становятся все более разнообразными. ЭВМ выступают в качестве крупных потребителей так называемых бинарных схем, обладающих двумя устойчивыми состояниями:

они открыты для прохождения тока или закрыты. Я тебе уже говорил, что их называют также «вентилями».

Другие схемы называются линейными, так как их выходное напряжение изменяется пропорционально изменениям сигнала на входе.

Ничто не останавливает прогресса в этой области, мой дорогой друг Незнайкин. Если ты перечитаешь это письмо через несколько лет, то невольно улыбнешься, так как многое несомненно изменится. Лишь одно останется неизменным — дружба, в которой заверяет тебя

твой Любознайкин



СОДЕРЖАНИЕ

◎

Айсберг Евгений

ТРАНЗИСТОР?.. ЭТО ОЧЕНЬ ПРОСТО!

Редактор **Т. В. Жукова**

Обложка художника **А. А. Иванова**

Технический редактор **Г. Г. Самсонова**

Корректор **В. С. Антипова**

Сдано в набор 21/I 1972 г. Подписано к печати 3/VII 1972 г. Формат 60×90[1]/16. Бумага типографская № 2. Печ. л. 9,0. Уч.-изд. л. 10,45. Тираж 100 000 экз. Зак. 159. Цена 50 коп.

Издательство «Энергия». Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Ордена Трудового Красного Знамени Ленинградская типография № 1 «Печатный Двор» им. А. М. Горького Главполиграфпрома Комитета по печати при Совете Министров СССР, г. Ленинград, Гатчинская ул., 26.

Цена 50 коп.